



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Air quality and urban mobility

Treball realitzat per:

Héctor Sánchez Bivona

Dirigit per:

Francesc Robusté Antón

Màster en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, Gener de 2018

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Abstract

For some years now, air quality in large cities is a matter of concern due to its effects on people's health. Urban traffic is one of the main emission generators, especially with respect to NO_x and PM_{10} . For several years, different actions are being applied around the world to reduce emissions related to transit. The purpose of this dissertation is to summarize the main actions that have been applied and the results obtained and study a possible implantation in the city of Barcelona.

In this case, it is analyzed the implementation of an environmental toll, which applies a fare according to the emissions of each vehicle, looking for the optimal extension to achieve a significant reduction of emissions and also guaranteeing the mobility with private transport.

The study concludes that the best option is to create three Low Emissions Zones, one corresponding to the city centre, an area between the city centre and Barcelona's urban highways and an area delimited by them, in such a way that a toll would be applied to enter each one of these zones.

Keywords: Environmental toll, congestion pricing, air quality, urban mobility, emissions.

Resum

Des de fa uns anys, la qualitat de l'aire a les grans ciutats és un tema de preocupació degut als efectes que té sobre la salut de les persones. Al centre d'aquest debat es troba el transit rodat dins de les grans ciutats, ja que és un dels principals generadors d'emissions, en especial pel que fa a NO_x i les PM_{10} . Des de fa uns anys s'estan duent a terme diferents polítiques arreu del món per tal de reduir les emissions relacionades amb el transit. L'objectiu d'aquesta tesina és resumir les principals actuacions que s'han aplicat i els resultats obtinguts per tal d'estudiar una possible implantació a la ciutat de Barcelona.

En aquest cas, s'analitza la implantació d'un peatge ambiental, amb aplicació d'una tarifa segons les emissions de cada vehicle, buscant quina és l'extensió òptima per tal d'aconseguir una reducció rellevant d'emissions i també que no suposi un impediment a la mobilitat dels usuaris del transport privat.

De l'estudi s'ha tret la conclusió que l'opció òptima és crear tres Zones de Baixes Emissions, una corresponent al centre de la ciutat, una altre entre el centre de la ciutat i les rondes i finalment una zona delimitada per aquestes, de tal manera que s'aplicaria un peatge per entrar a cada una d'aquestes zones.

Paraules clau: Peatge ambiental, peatge urbà, qualitat de l'aire, mobilitat urbana, emissions.

Índex

1. Introducció i Objectius.....	2
2. Situació actual.....	6
3. Mesures Actuals a Barcelona.....	24
4. Metodologia.....	41
5. Aplicació al cas de Barcelona	56
6. Resultats.....	75
7. Conclusions i investigació futura	86
Referències	90

1. Introducció i Objectius

Des de fa temps la contaminació generada per l'activitat humana ha centrat l'atenció de les autoritats tant ambientals com sanitàries. Inicialment la preocupació principal han estat les emissions de CO₂, ja que és un dels principals causants de l'efecte hivernacle que està provocant un augment global de les temperatures, que ens està portant al desgel de les grans àrees gelades del planeta, com són els pols, amb especial preocupació de l'Antàrtida i de Groenlàndia, ja que el seu desgel està directament relacionat amb l'augment del nivell del mar i que desembocarà en greus inundacions en les zones litorals d'arreu del planeta.

D'aquesta preocupació en va sorgir el protocol de Kyoto, que es va començar a gestar al 1997, i té com a principal objectiu la reducció de les emissions de CO₂ de cada país.

Pel que fa a les emissions de CO₂ relacionades amb els vehicles a motor, des del principi dels anys 90 a Europa, s'han anat aplicant diferents normatives EURO que limiten les emissions de CO₂ dels vehicles que han estat fabricats després de l'aplicació de les successives normatives, que amb els anys han anat fent-se cada vegada més restrictives.

Recentment, han entrat dins del debat de la contaminació altres elements. Concretament aquells elements que són directament nocius per a la salut de les persones i que no tenen un efecte tant global, tot i que afecten a la majoria de les

grans ciutats del món, sinó que tenen efecte local i estan molt relacionats amb el transit dins de les ciutats que provoquen que les concentracions siguin molt elevades.

Els elements que preocupen més a les autoritats sanitàries són els òxids de nitrogen, coneguts com a NO_x i les PM_{10} , partícules amb un diàmetre inferior a les 10 micròmetres.

Com a exemple d'aquesta creixent preocupació tenim les restriccions cada vegada mes estrictes que han anat aplicant les diferents normatives EURO que a partir del 2000 ha anat ha afegit les restriccions de NO_x i ha endurit les de PM_{10} dels vehicles diesel i n'ha afegit als gasolina.

Com s'ha pogut comprovar, la implantació de mesures que redueixen les emissions dels vehicles per si soles no poden reduir les concentracions, ja que amb els anys el parc mòbil dels diferents països ha anat augmentant.

En aquest punt han tingut que entrar en acció les autoritats locals de les grans ciutats. Si mirem el que s'ha fet a Europa en aquest sentit, veiem que s'han implantat diverses mesures que intenten reduir la contaminació al centre de les grans ciutats europees, tant per reduir la congestió del transit com la contaminació generada per aquest.

La primera ciutat en aplicar restriccions del transit va ser Estocolm (1997), i des de 2007 aplica una taxa a tots els vehicles que entren i surten del centre. La *Congestion Charge* aplicada a Londres que es la zona de limitació més gran que podem trobar actualment, i aplica una taxa a tots els vehicles que entrin al centre, igual que la *ECOPASS AREA* de Milà.

Per tant, això constata que no es tracta d'un problema concret de Barcelona, sinó que afecta a totes les grans ciutats del món que suporten una gran quantitat de transit rodat i és un tema d'actualitat al món, i en especial també a Europa, ja que va haver-hi una gran aposta pels vehicles diesel, que són els més contaminants pel que respecte a NO_x i PM_{10} . També cal mencionar que l'any 2014 ha entrat en vigor la nova normativa EURO VI.

A Barcelona, les diferents administracions han estat intentant reduir aquests valors amb diferents polítiques, que moltes vegades han tingut un efecte molt local o amb reduccions mínimes, altres han aconseguit l'efecte contrari al desitjat, altres que suposen un cost massa elevat per la seva aplicació i d'altres han comptat el refús de part de la població per entrar en conflicte amb els interessos dels diversos col·lectius de la ciutat.

L'objectiu d'aquest treball és presentar una proposta per intentar reduir les emissions de tant de NO_x com de PM_{10} relacionades amb el transit. Concretament, en primer lloc es vol que la reducció sigui del 30%, ja que això suposaria situar el global d'emissions anuals per sota del límit nociu per la salut de les persones proposat per la Organització Mundial per la Salut (OMS), i en segon lloc, conscienciar a la població, i a llarg termini, incitar al desenvolupament de tecnologies aplicades a la automoció més netes, així com a la utilització dels usuaris d'aquestes.

Aquest estudi consistirà en la proposta d'un peatge ambiental per a entrar en una determinada zona de Barcelona tenint en compte tant les necessitats dels ciutadans com les zones amb major concentració de contaminants.

Per arribar a aquest objectiu primer definirem quina és la situació actual de Barcelona, així com quins són els elements nocius que afecten a la salut de les persones. També donarem una ullada a les mesures que s'han dut a terme Europa.

Seguidament, avaluarem les mesures que s'han pres a Barcelona, fent un anàlisi qualitatiu dels seus efectes positius i negatius, veient així la seva efectivitat.

A continuació definirem el model de la reducció d'emissions per tal de poder calcular quin és la reducció de les emissions, així com el model del peatge que volem aplicar i finalment quin és el funcionament conjunt del model. També definirem quins són els paràmetres que afecten més a aquest model, així com quins són els que venen definits per el cas concret.

Finalment, aplicarem el nostre model a Barcelona, i calibrarem els paràmetres per tal aconseguir el nostre objectiu de reduir un 30% les emissions relacionades amb el transit.

Per acabar, avaluarem els resultats obtinguts per tal de veure si la seva aplicació és viable a la ciutat de Barcelona, així com quins són els seus punts forts i els seus punts febles.

2. Situació actual

Des de fa molts anys, hi ha una gran preocupació per les emissions mundials de CO₂, ja que és el responsable de l'efecte hivernacle que accelera el canvi climàtic. Això és especialment preocupant perquè està provocant el desgel de les grans masses gelades del planeta, especialment dels pols. En canvi, el seu efecte local en el punt de generació és limitat, ja que només és nociu per a les persones en concentracions molt elevades.

Actualment, ha crescut la preocupació per altres elements generats per la combustió dels combustibles fòssils. Aquests elements no tenen efectes globals, ja que són perillosos quan es troben grans concentracions, per tant, el seu efecte és local. Per tant, la seva problemàtica es centra en la concentració d'aquests elements en les seves zones d'emissió i en la possibilitat de diluir la concentració.

Aquests elements nocius són els òxids de nitrogen (NO_x) i les partícules menors a 10 µm (PM₁₀). Entre els principals emissors d'aquestes partícules a les ciutats trobem el transit rodat, que en el cas de Barcelona suposa aproximadament el 30% de les emissions totals generades a la ciutat d'aquests dos tipus d'elements nocius.

Els òxids de nitrogen són compostos químics binaris formats per la combinació de nitrogen i oxigen. El procés de formació d'aquests elements inorgànics és la combustió a altes temperatures, procés en el qual l'aire normalment es el comburent.

En l'àmbit urbà, el principal emissor d'aquests elements són els motors de combustió dels vehicles que circulen per la ciutat. El seu efecte es veu maximitzat a les

grans ciutats, on el nombre de vehicles és molt elevat i la ventilació es veu dificultada pels propis edificis de la ciutat.

Els efectes d'una exposició a curt termini a l' NO_2 són la irritació del sistema respiratori i ocular. A llarg termini, els principals efectes poden ser un desenvolupament pulmonar més lent als nens i l'aparició de malalties respiratòries cròniques i cerebrovasculars. Encara que tota la població estigui exposada als contaminants atmosfèrics, no afecten a tothom de la mateixa manera. Els nens, la gent gran i les persones amb problemes de salut com asma i malalties del cor o pulmó poden ser més sensibles als seus efectes adversos.

Les PM_{10} són petites partícules sòlides o líquides disperses a l'atmosfera, amb un diàmetre entre 2,5 i 10 μm . Estan formades principalment per compostos inorgànics com els silicats, aluminats i metalls pesants, així com material orgànic associat a partícules de carboni (sutge). El nom prové de material particulat (PM de l'anglès *particulate matter*) i de 10, la mida màxima de les partícules (en micròmetres). Les partícules poden tenir diferents orígens com poden ser pols, cendra, sutge, partícules metàl·liques, ciment o pol·len.

El principals productors d'aquestes partícules són la combustió de combustibles fòssils, però també, en el cas del transit rodat el rodament dels pneumàtics fa que a mesura que es van desgastant , es desprenguin partícules amb el moviment, encara que el seu volum és molt inferior al generat per la combustió.

Els nivells alts de partícules fines en suspensió a l'aire degudes a l'activitat humana, tenen un efecte advers sobre la salut, provocant malalties greus, com poden

ser el càncer de pulmó, altres malalties del sistema respiratori, i malalties del sistema circulatori.

Un element a tenir molt en compte pel que fa a les emissions tant de NO_x com de PM_{10} és la velocitat de circulació, ja que podem trobar grans diferències d'emissions segons si els vehicles circulen a baixes, a mitges o altes velocitats. En ambdós casos trobem diferències però amb comportaments semblants.

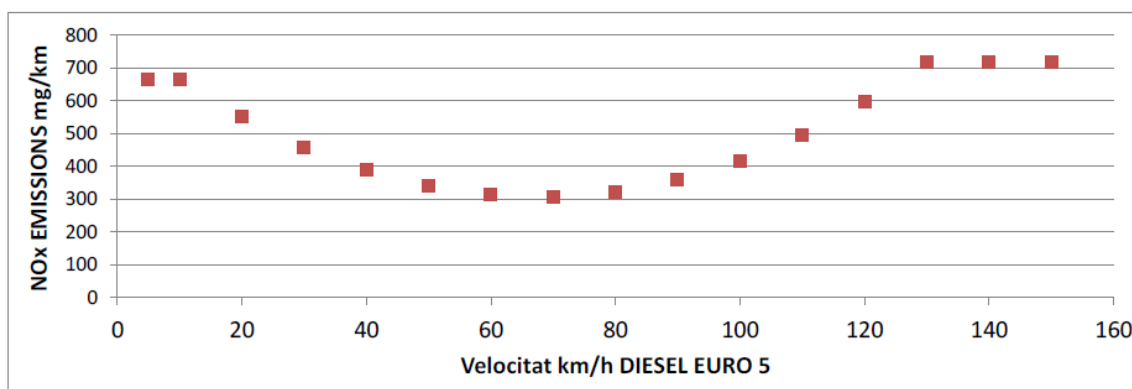


Fig. 1. Emissions de NO_x en funció de la velocitat de circulació per un turisme diesel EURO V. Font: (Brandson & Nicholson, 1990).

Pel que fa a les emissions de NO_x , com podem veure a la Fig. 1 com segons la velocitat el vehicle, la quantitat de NO_x emesa varia, trobant un mínim al voltant dels 70 km/h. Com es pot observar, la diferència és de aproximadament 400 mg/km, en aquest cas, més de un 130%, entre el mínim a 70 km/h i el màxim a un 130 km/h.

Si mirem el rang de velocitats que podem trobar a dins de la ciutat, entre 10 i 80 km/h, veiem com que en cas de molta congestió, i per tant velocitats baixes, estaran al voltant dels 700 mg/km, mentre que als 80 km/h al voltant de 300 mg/km. Per tant, per tal de que poder reduir les emissions, és molt important garantir una velocitat de circulació elevada per tal de poder minimitzar les emissions dels vehicles.

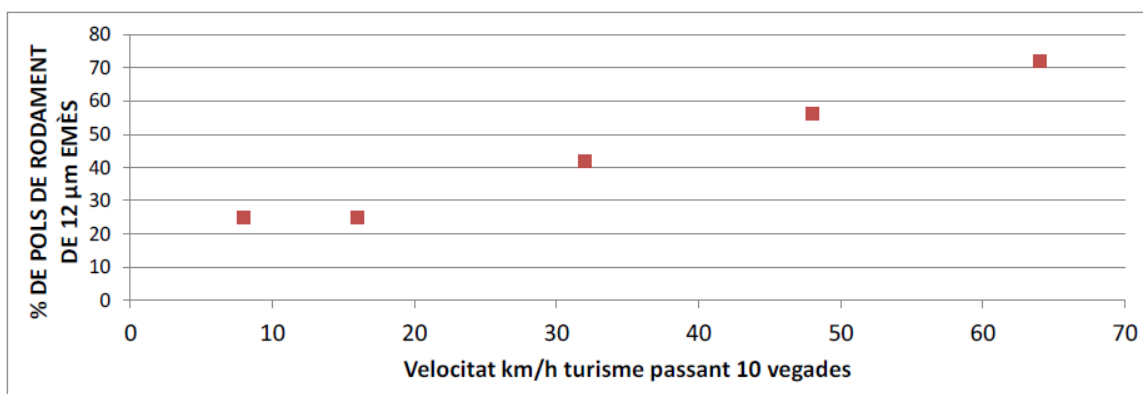


Fig. 2. Percentatge de pols de rodament de 12 µm emès d'una superfície per on ha circulat 1 turisme de mida mitjana durant 10 vegades. Font: (Brandson & Nicholson, 1990).

Si ens fixem en les PM_{10} , en la Fig. 2, podem veure com el comportament és contrari al dels NO_x . En aquest cas, el mínim el trobem a velocitats baixes, ja que el percentatge de pols de rodament és del 25%, mentre que per velocitats de 50 km/h el percentatge augmenta fins a aproximadament el 60%. Amb això, es demostra la idoneïtat de les zones a 30 per tal de reduir problemes de PM_{10} .

Per tant, la Fig. 1 i com la Fig. 2 posen de manifest la importància de la velocitat de circulació en la reducció de les emissions tant de NO_x com de PM_{10} , i en la regulació d'aquesta per tal de solucionar els problemes concrets de cada punt.

Actualment, el transit viari de Barcelona genera el 33% de les emissions de NO_x de la ciutat, amb 4.021,8 tones emeses al 2013, només superat per les emissions del port, i el 37% de les emissions de PM_{10} , 360,6 tones.

Com a resposta a aquesta preocupació, des de la Unió Europea s'han designat uns límits acceptables per les concentracions d'elements contaminants, tant per els NO_x com per les PM_{10} . La directiva que indica quins són els valors límit es la 2008/50/CE. Cal mencionar que aquests límits coincideixen amb els que indica la OMS

com a valors límit acceptables, però en recomana uns valors saludables un 30% inferiors als marcats per la UE.

Pel que fa a als NO_x , s'estableixen dos valors límit, el Valor Límit Anual (VLA) i el Valor Límit Horari (VLH). El VLA està fixat en $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i el VLH de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que no pot superar-se més de 18 vegades per any.

Per l'Àrea Metropolitana de Barcelona, el valor crític és el VLA, que no s'ha incomplert mai a Barcelona, però és molt proper al límit, com podem veure a la Fig. 3, on es comparen els valors de NO_2 enregistrats a Sabadell, Barcelona i l'Hospitalet entre el 1995 i el 2013, els valors de Barcelona estan sempre al voltant dels $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En canvi, l'Àrea Metropolitana de Madrid té el problema contrari, ja que el valor crític es el VLH. Per exemple, el 7 de juliol de 2015 ja s'havien superat les 18 hores de superació anuals per tot el 2015.

Això ens indica que les solucions necessàries per Barcelona són molt diferents a les necessàries a Madrid. En el nostre cas, les nostres mesures hauran de ser estructurals per tal de reduir les emissions mitjanes, que són les més problemàtiques.

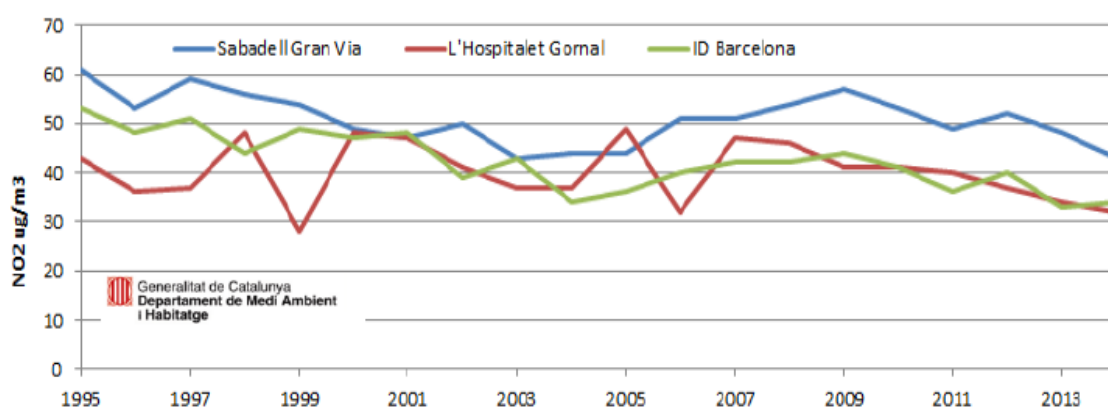


Fig. 3. Nivells mitjans anuals d' NO_2 enregistrats a de Sabadell, Barcelona i L'Hospitalet de 1995-2015.

Font: Departament de Medi Ambient i Habitatge.

Pel que fa a les PM_{10} , tenim 3 valors límit. Un VLA per PM_{10} i un altre per $PM_{2,5}$, que no poden superar els 40 i 25 $\mu g/m^3$ respectivament (en vigència des de 2005 i 2015 respectivament), i un Valor Límit Diari (VLD) fixat per PM_{10} , que no pot excedir-se més de 35 dies per any, el VLD és de 50 $\mu g/m^3$.

Pel que fa a les superacions de PM_{10} , des de 2005 fins a 2013 es van superar els VLA i/o VLD de PM_{10} , primer de manera generalitzada, i finalment de manera local. Una dada a destacar, és el fet que entre 2006 i 2008 es van registrar màxims històrics a algunes zones de Barcelona, que fins hi tot van figurar entre les més contaminades d'Europa (incloent l'Europa de l'est), degut al mal control ambiental de les obres de l'AVE i de la Línia 9 del Metro. Al 2014 ja no es van superar més les VLA i només en alguns punts al 2015 les VLD.

A la Fig. 4, es poden veure l'evolució de les concentracions de PM_{10} en el període entre 2000 i 2013 en diferents punts de l'AMB, on es pot veure indicat també el límit establert per la UE, pel que fa a les VLA (gràfic superior) i a les VLD (gràfic inferior). Com es pot apreciar, des de 2010 no es compleix al 100% la VLA i des del 2013 la VLD. Si mirem també el límit recomanat per la OMS, aquest no es compleix fins al 2013, i només en alguns punts. També es pot apreciar l'augment exagerat en els valors enregistrats en algunes zones entre el 2006 i 2008 que hem mencionat anteriorment.

En tot cas, es compleixen els valors límit, però estem molt per sobre dels valors recomanats per la OMS. En aquest cas, com per els NO_x , les mesures estructurals són es que millors efectes tenen en la reducció del valor de les emissions, ja que les eventuais no solucionen aquests problemes a llarg termini.

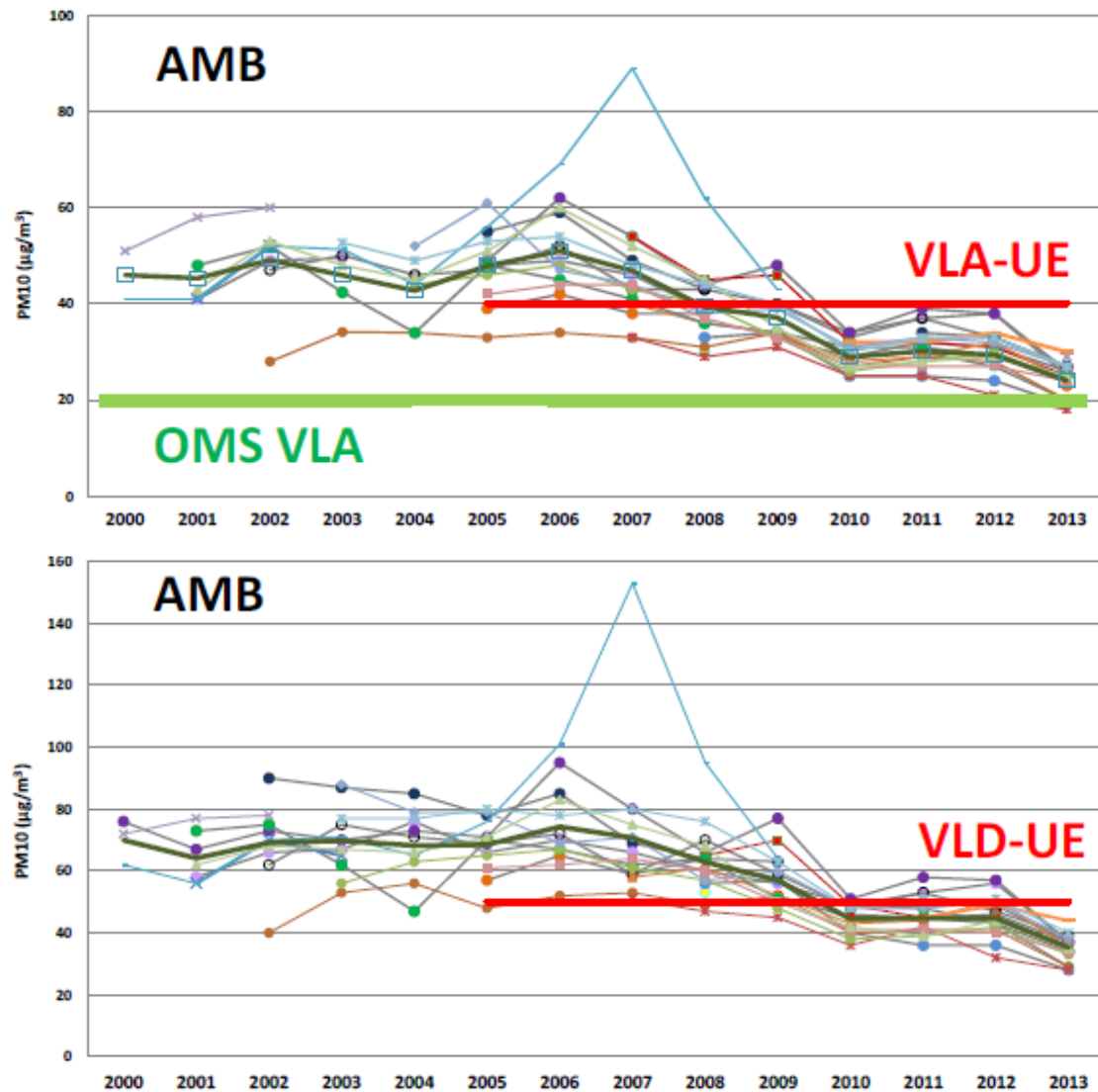


Fig. 4. Evolució dels valors límit anual i diari (VLA y VLD) de PM_{10} a una selecció d'estacions de l'AMB, i percentatge de reducció 2000-2014.

Normativa EURO

Amb les dades que hem indicat anteriorment, és fàcil veure com el transit rodant és un dels principals generadors d'elements contaminants, i encara pren més importància si tenim en compte que és el que genera aquests elements més a prop de les persones, en comparació amb les indústries i el port que generen la pol·lució principalment en zones perifèriques.

Amb aquesta perspectiva i les iniciatives per controlar els nivells d'emissions la UE va crear les normes EURO per obligar a tots els vehicles que es vinguin a la UE compleixin uns requisits mínims d'emissions.

Actualment tenim quatre tipus de motors en el nostre parc mòbil. Els elèctrics, que no generen cap tipus de contaminat derivat de la combustió, i encara són minoria degut a la actual poca autonomia i també als problemes relacionats amb la recàrrega de bateries, ja que encara hi ha poques estacions de recàrrega disponibles. L'altre gran grup de motors són els de combustió, en els que destaquen els de gasolina i els diesel, encara que també en tenim de gas natural, encara que la seva presència en turismes és mínima, i en el cas dels autobusos és més utilitzat, ja que AMB en té dintre de la seva flota. En els últims anys han aparegut vehicles híbrids que combinen motor de combustió gasolina amb motor elèctric i han aconseguit reduir en gran mesura les emissions.

Si comparem les dues tipologies dominants veiem com hi ha un ordre de magnitud de diferència entre els dos tipus de motor, amb el gasolina com a motor més "net" pel que fa a PM_{10} i NO_x respecte al diesel. En aquest sentit, les diferents normatives EURO sobre les emissions dels vehicles han anat reduint els límits per cada generació de motors. La normativa actual és la EURO VI, que va entrar en vigor al 2014.

La primera norma EURO I va aparèixer al 1992 i només limitava les PM_{10} en els vehicles diesel. Al 2000 amb la introducció de la EURO III es va introduir la limitació per NO_x per tots els vehicles i al 2009 amb la EURO V es van limitar les emissions de PM_{10} per els motors de gasolina. A la Taula 1, es pot veure la data d'aplicació de les diferents normatives EURO pels turismes M1, així com les limitacions d'emissions per una sèrie

de contaminants per cada generació de motors, tant per vehicles diesel com de gasolina.

Tipus	Data d'aplicació	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM ₁₀
Diesel						
Euro I	Juliol de 1992	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	0.14 (0.18)
Euro II, IDI	Gener de 1996	1.0	-	0.7	-	0.08
Euro II, DI	Gener de 1996	1.0	-	0.9	-	0.10
Euro III	Gener de 2000	0.64	-	0.56	0.50	0.05
Euro IV	Gener de 2005	0.50	-	0.30	0.25	0.025
Euro V	Setembre de 2009	0.50	-	0.23	0.18	0.005
Euro VI	Setembre de 2014	0.50	-	0.17	0.08	0.005
Gasolina						
Euro I	Juliol de 1992	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	-
Euro II	Gener de 1996	2.2	-	0.5	-	-
Euro III	Gener de 2000	2.30	0.20	-	0.15	-
Euro IV	Gener de 2005	1.0	0.10	-	0.08	-
Euro V	Setembre de 2009	1.0	0.10	-	0.06	0.005
Euro VI	Setembre de 2014	1.0	0.10	-	0.06	0.005

Taula 1. Data d'aplicació i limitacions de les diferents normatives EURO.

Aquesta normativa també categoritza els vehicles en funció del tipus de vehicle, així com pel pes en el cas dels vehicles pesats per tal de adaptar les normatives a les necessitats de potència de cada vehicle, i les emissions derivades de cada tipus. Aquesta classificació és la següent:

- **Categoria M:** Vehicles a motor destinats al transport de persones y que tinguin com a mínim quatre rodes, es subclassifiquen com:
 - **M1:** amb un màxim de 8 places més el conductor.

- **M2:** amb més de 8 places més la del conductor i Massa Màxima Autoritzada (MMA) no superior a 5000 kg.
- **M3:** la resta de vehicles destinats al transport de persones.
- **Categoria N:** Vehicles a motor destinats al transport de mercaderies que tinguin com a mínim quatre rodes, cal diferenciar:
 - **N1:** amb MMA no superior a 3500 kg.
 - **N2:** amb MMA superior a 3500 kg.
 - **N3:** amb MMA superior a 12000 kg.
- **Categoria L:** Vehicles a motor amb menys de quatre rodes.

Exemples d'actuacions a ciutats Europees

Com hem comentat abans, el problema de la baixa qualitat de l'aire és molt comú a les grans ciutats europees, on s'han iniciat diverses accions per tal de reduir els problemes relacionats amb aquesta mala qualitat de l'aire. Una de aquestes solucions és la coneguda com a Zona de Baixes Emissions (ZBE).

Les ZBE són àrees on l'accés és restringit per raons d'emissions a alguns vehicles. Generalment, aquestes restriccions es basen en els estàndards dels vehicles vigents en la seva fabricació. Les restriccions van des de la prohibició d'entrada dels vehicles que no compleixen certes condicions a taxes a la entrada a aquests zones. La extensió d'aquestes zones va de uns quants carrers a una gran area de la ciutat.

Una ZBE bàsicament introdueix canvis el comportament de la flota de vehicles, ja sigui per la disminució de la demanda o per la renovació de la flota per vehicles

menys contaminants que resulta en una reducció de les emissions que no hagués tingut lloc si no s'hagués implantat la ZBE. Amb el temps els efectes de les ZBE es van reduint acostant-se als nivells inicials, pel que si es vol seguir millorant la seva eficiència s'ha de anar incrementant el nivell d'exigència d'aquestes zones.

Les primeres ZBE a Europa es van establir al 1996 a Estocolm, Göteborg i Malmö a Suècia, i es van anomenar *Environmental Zones*. Els vehicles *Heavy Duty Vehicles* (HDVs) més antics van ser prohibits i als de mitjana edat se'ls va demanar incorporar dispositiu de control d'emissions o el canvi de motor. Al 2002 es van incloure restriccions a les emissions de NO_x, i al 2006, el govern suec va establir un esquema nacional per les ZBE. Actualment, els vehicles de la categoria N3 amb motors de la generació EURO V tenen permís per circular fins al 2020, els de generacions anteriors ja no poden circular dins d'aquestes zones.

La primera ZBE creada fora de Suècia va ser el túnel del Mont Blanc, que uneix França i Itàlia, l'any 2002, on els HDVs havien de tenir un motor que complís com a mínim l'estàndard EURO III.

Hi ha molts exemples d'aplicacions de ZBE amb diferents tipus de criteri. La majoria d'elles restringeixen l'entrada als camions més grans, però, Alemanya, Grècia (Atenes) o Portugal (Lisboa) també inclouen restriccions als cotxes. Itàlia també inclou restriccions als vehicles de dues rodes.

Pel que fa al horari de restriccions, trobem exemples de funcionament 24/7, que és el cas majoritari. També trobem exemples d'aplicació només als caps de setmana (Atenes i Budapest) o exemples de aplicació de 12 hores diàries de dilluns a dissabte, com és el cas de Lisboa. Algunes ZBE italianes només restringeixen els cotxes

al hivern, i en canvi les motocicletes i autobusos diesel tot l'any. Un exemple semblant, és el cas d'Atenes, que només funciona de setembre a juliol.

Pel que respecta al sistema de control, la gran majoria de ZBE utilitzen sistemes automàtics de lectura de matricules, tot i que requereixen l'ús de adhesius indicatives per el seu funcionament. També és possible trobar algun cas on el control és manual. A la Taula 2 podem veure la comparativa entre les ZBE dels diferents països on s'han aplicat.

País	Nombre de ZBE	Vehicles restringits	Legislació nacional
Austria	3	HDVs	Si
Republica Checa	1	HDVs	No
Dinamarca	6	HDVs	Si
Finlandia	1	Autobusos i camions	No
França	1	HDVs	No
Alemanya	70	Tots els vehicles excepte motos	Si
Grècia	1	Tots els vehicles a la ZBE interior, vehicles >2,2 t a la ZBE exterior	No
Itàlia	92	Varies	No
Països Baixos	13	HDVs	Si
Portugal	1	Cotxes i HDVs	No
Suècia	8	Tots els vehicles >3,5 t	Si
Regne Unit	3	HDVs i a Londres també LDVs	No
Unió Europea	200	-	No

Taula 2. Comparativa de les ZBE entre diferents països. Font: (Holman, Harrison, & Querol, 2015).

ZBE de Londres

La ZBE de Londres va començar al 2008 i és la més gran del món amb més de 1.500 km². A la Fig. 5, podem veure en el mapa de Londres la seva situació. Funciona les 24 hores del dia, els set dies de la setmana i utilitza càmeres amb un sistema automàtic de reconeixement de matricules. Aquesta ZBE es va introduir per fases, com podem veure a la Taula 3.

Els usuaris que no compleixen els criteris d'emissions o que no estan registrats al sistema han de pagar una taxa diària. Tots els vehicles es tenen que registrar al sistema, inclosos els estrangers.

Fase	Data d'introducció	Vehicles restringits	Estàndard mínim
1	4 Febrer 2008	HDVs >12t	EURO III per PM
2	7 Juliol 2008	HDVs >3,5t	EURO III per PM
3	3 Gener 2012	Furgonetes grans 1,2 (tara) – 3,5 t Vehicles utilitaris lleugers 4x4 Pickups Ambulàncies 2,5 – 3,5 t Autocaravanes Minibuses (>8 pax) (fins a 5t)	EURO III
4	3 Gener 2015	HDVs >3,5 t Autobusos >5 t	EURO III
5	Desembre 2015	Autobusos operats per Transports of London	EURO IV
6	Planejat per 2020	Tots els vehicles. Estudi d'una Zona d'Ultra Baixes Emissions	EURO VI

Taula 3. Evolució dels criteris d'emissions a la ZBE de Londres. Font: (Holman, Harrison, & Querol, 2015).

Els estudis mostren que inicialment el percentatge de vehicles que complien les restriccions era del 80% i un any després de la seva aplicació va passar a ser del 95% estabilitzant-se després al voltant del 98%. Això mostra que va haver-hi una renovació del parc mòbil, tot i que posteriorment va retornar a l'antiguitat mitjana anglesa.

Transports Of London al 2014 va trobar que la taxa de compliment de la fase 3 superior al 98% i superior al 95% a fase 4 a finals de 2013.

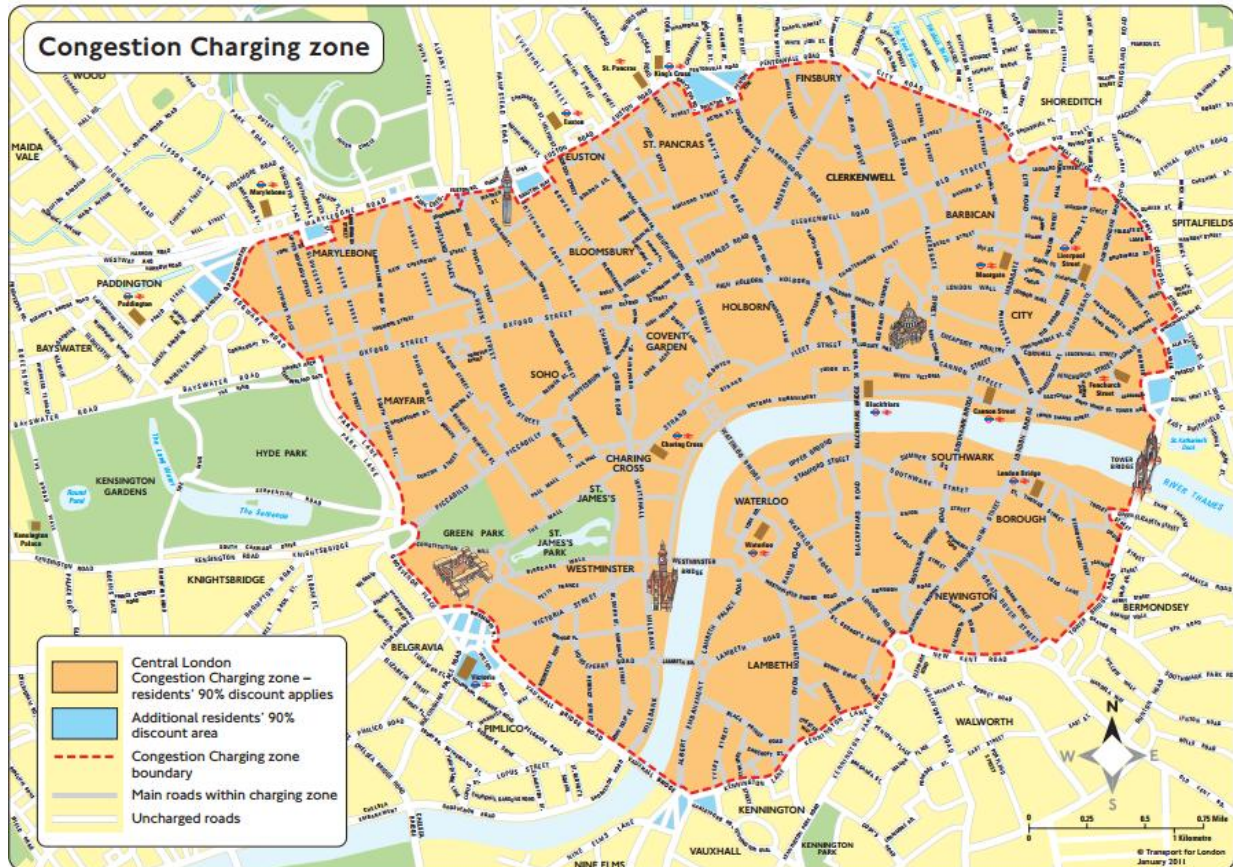


Fig. 5. Ubicació i extensió de la Congestion Charge de Londres. Font: *Transports Of London*.

ZBE Alemanes

Alemanya té una legislació nacional sobre les ZBE que va ser aplicada al 2007. Per entrar-hi, els vehicles tenen que portar visible l'etiqueta identificativa. Aquestes etiquetes distingeixen tres categories:

- **Verd:** vehicles diesel EURO IV o superior o EURO II amb filtre de partícules o gasolina EURO I o superior. Prohibeix tots els vehicles diesel construïts abans del 2000.

- **Groc:** Vehicles diesel EURO III o EURO II amb filtre de partícules i construïts després de 1996.
- **Vermell:** Vehicles diesel EURO II o EURO I amb filtre de partícules i construïts després de 1992.
- Els vehicles que no compleixen cap d'aquests requeriments estan a la classe de pol·lució 1.

Al 2011 les ciutats van començar a requerir etiquetes verdes, que al 2014 ja estaven aplicades a la majoria de ciutats. Les motos, els cotxes clàssics i *off-road*, policia, Bombers i vehicles d'emergències estan exclosos de restriccions.

Com exemples d'extensió, tenim el cas de Berlín, que avarca 88 km² incloent el centre de la ciutat (aproximadament el 10% de la ciutat), on hi viu aproximadament 1 milió de persones. Un altre exemple és Munic, on l'àrea és de 44 km², un 14% de la ciutat.

ZBE Italianes

Itàlia té un gran nombre de ZBE repartides per tot el país, però sobretot estan localitzades al nord. Com que no hi ha una legislació nacional, moltes ZBE tenen requeriments molt complexos. La majoria d'elles només funcionen al hivern, i algunes d'aquestes només a les hores punta.

Al no tenir una legislació estatal, podem trobar casos on hi hagi una ZBE regional amb una ZBE local amb diferents criteris d'entrada. També trobem moltes exempcions, i normalment, les restriccions s'apliquen a cotxes molt antics. No hi ha

cap tipus de etiqueta que caracteritzi les emissions, només hi ha poca informació i en angles sobre les emissions, excepte en el cas de Milà, que explicarem a continuació.

Al 2008, la Municipalitat de Milà va restringir la entrada a certs vehicles al centre històric, una àrea de 8,2 km², coneguda com *Ecopass Area*. A la Fig. 6 podem veure l'extensió actual de la *Ecopass Area*.

Els vehicles inferiors a EURO IV diesel havien de pagar una taxa per entrar a la zona entre les 8:00 i les 20:00. A Finals de 2011, va combinar-se la ZBE amb un sistema de peatge urbà conegut com a *Area C*. També hi ha una gran ZBE que cobreix la regió de la Llombardia i una altre que cobreix la zona del “gran” Milà.



Fig. 6. Zona d'influència de l'ECOPASS. Font: Comune di Milano.

La ZBE de la Llombardia restringeix permanentment la entrada a les motocicletes de dos temps i ciclomotors preEURO I i els autobusos anteriors a EURO III.

Addicionalment, d'octubre a abril, la ZBE del "gran" Milà restringeix l'entrada als vehicles de gasolina preEURO I i als vehicles diesel preEURO III de 7:30 a 19:30 als caps de setmana.

ZBE holandeses

Els Països Baixos té una legislació estatal per les ZBE que originalment es centrava en els HDVs, però al 2011 va incloure també als *Light Duty Vehicles* (LDVs). L'entrada va ser primer restringida als HDVs preEURO III i, al 2013, es va augmentar als preEURO IV. Pel que respecte als LDVs, aquests han de estar matriculats a partir del 2001. La legislació defineix un nombre d'excepcions, que permet també exempcions locals addicionals. També es permeten 12 entrades a l'any als vehicles que no compleixen les restriccions.

Al 2007 hi havia 6 ZBE, anomenades *Milieuzone*. Al 2014, el nombre de ZBEs havia augmentat fins a 13 ZBE.

Si ens fixem en l'exemple d'Amsterdam, la ZBE es va establir a l'octubre de 2008 i cobria una zona de 20 km². Inicialment era una prova sense penalitzacions, però a partir de gener de 2009 els HDVs preEURO III van tenir l'entrada prohibida. Des de 2010, el criteri es va augmentar al vehicles EURO III sense filtre de partícules. El control es fa mitjançant un sistema automàtic de reconeixement de matricules que multa automàticament. La ZBE funciona tots els dies les 24 hores.

ZBE daneses

Dinamarca també legislació estatal. Des de 2008, els HDVs han de complir la normativa EURO II per accedir a les ZBE, i des de 2010 la EURO III.

Com hem pogut veure, hi ha una gran varietat d'exemples d'aplicació, amb diferències de mides, diferències de temps de funcionament i diferències restrictives, però en tots els casos s'ha constatat unes reduccions del 7% en PM_{10} i el 4% en NO_2 , segons els resultats exposats per (Holman, Harrison, & Querol, 2015). Cal tenir en compte que hi ha una gran influència de les condicions meteorològiques, que poden portar a grans diferències de concentracions tant horàries com diàries.

3. Mesures Actuals a Barcelona

El grup de treball sobre la Qualitat de l'Aire a la ciutat de Barcelona s'han suggerit una sèrie de mesures pels casos d'episodis a la ciutat.

S'han creat dos grups de mesures. El primer te efectes en situacions de pre avís, és a dir, quan es superen els 160 µg de NO_x o els 50 µg de PM₁₀, i el segon en episodis, quan es superen els 200 µg de NO_x o els 80µg de PM₁₀, que serien addicionals a les primeres. A la Taula 4 podem veure les mesures adoptades per cada nivell d'alerta.

En aquest apartat analitzarem i discutirem la els efectes de cada mesura, així com els costos associats, per tal de poder de poder determinar la viabilitat i eficàcia de cada mesura. Per fer-ho, classifiquem les diferents mesures en tres nivells, de manera que el primer nivell, efectivitat alta, correspondrà a les mesures que tinguin grans efectes en la reducció de contaminants i que no suposin un cost elevat ni per l'administració ni per els usuaris. En el segon nivell, efectivitat mitja, estaran aquelles mesures que ajudin a reduir els nivells de contaminants, però que tinguin un cost elevat, i per tant, la seva aplicació ha de venir després de les del nivell verd. Per últim, en el nivell d'efectivitat baixa, on tindrem aquelles mesures que tinguin un efecte molt limitat i tinguin molts costos associats, i per tant, sigui inviable la seva aplicació.

Saludable	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Pre-avís	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ més de 20 dies /any	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	<ul style="list-style-type: none"> • Limitar la capacitat d'entrada a la ciutat via regulació semafòrica donant prioritat al transport públic i als VAO mitjançant un carril especial (existent o que s'habilitarà a tal efecte). • Incrementar el transport actiu en alguna zona, reconvertint carrils de circulació a carrils bici. • Mesures de promoció del TP. 	<ul style="list-style-type: none"> • Increment del reg, amb aigua freàtica, dels carrers de 2h a 4h. • Reg amb aigua freàtica, de places i parcs no asfaltats. • Intensificar el control de compliment del Pla d'ambientalització de les obres. • Prohibició de bufadors en neteja de carrers i espais públics. • Restricció d'activitats que aixequin pols en obres.
Episodi	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	<ul style="list-style-type: none"> • Regulació específica d'aparcament per a no residents. • Regulació de la circulació de taxis en buit en les zones més castigades per la contaminació. • Prohibir càrrega i descàrrega de 7h a 11h i l'aturada dels busos discrecionals. • Circulació matrícules parells/senars. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducció de la velocitat de les vies principals a 30 km/h (sempre i quan el protocol no estigui activat també per NO₂).

Taula 4. Mesures adoptades segons el nivell d'alerta.

Limitar la capacitat d'entrada a la ciutat via regulació semafòrica donant prioritat al transport públic i als VAO mitjançant un carril especial

El punt positiu d'aquesta mesura és que ens dóna l'avantatge de disposar de la “clau de pas de l'aixeta” del trànsit entrant a BCN amb graduació contínua (temps de fase verda), i per tant, podem graduar el flux depenent de les necessitats de cada moment. I per que això sigui efectiu caldria dissenyar un pla de park&pool's per a incrementar l'ocupació dels vehicles i que sigui efectiu el carril addicional bus-VAO.

Per tant, per que la mesura fos efectiva, s'hauria de acompanyar la proposta d'un pla de park&ride's i unes reduccions del preu d'aparcament a Barcelona per a vehicles d'alta ocupació amb l'objectiu d'incrementar l'ús d'aquests carrils.

Per altre banda, s'hauria d'abordar el problema de la demostració de l'ocupació real del vehicle, que és un problema merament tecnològic i pot resoldre's tal i com s'ha fet per als descomptes a VAO 3+ en les autopistes de peatge, i per tant, només caldria adaptar aquesta tecnologia a la infraestructura existent.

També caldria definir què s'entén per “VAO” (2+, 3+) i el mecanisme de control d'aquesta mesura puntual en els carrils habilitats expressament pels episodis. Un altre punt a tenir en compte són aquests els carrils bus-VAO especials per el episodis que podrien habilitar-se fent servir els carrils reversibles senyalitzats (VMS) i abalisats en alguns accessos a BCN, o segregant-los via amb cons als vorals o algun carril a contra-flux com a les operacions “entrada” i “sortida”.

Analitzant la situació actual, veiem que la pròpia estructura i capacitat en les vies d'entrada a la ciutat ja està actuant de reguladora de les vies d'entrada, fa de coll d'ampolla. Per tant, els resultats d'aquesta mesura potser no seran tan significatius

com els esperats, ja que part de la seva funció ja s'està duent a terme, i el seu efecte només l'accentuaria més. Per aquest motiu hem qualificat l'efectivitat d'aquesta mesura com "mitjana-baixa".

Aquesta mesura també té alguns punts en contra, ja que en ser una mesura puntual, es poden crear cues amb vehicles amb motors encesos als semàfors i a les carreteres aigües amunt d'ells com a afegit a les cues que es formen normalment, que faria que l'efectivitat de la mesura es veiés reduïda (efecte spillover), ja que produiria més stop&go per efectes acordió a les carreteres, i per tant més, emissions.

S'ha de tenir en compte també que aquesta mesura no afecta al trànsit intern a Barcelona, que suposa el 50% del transit de la ciutat, que podria mantenir el nivell de contaminació, ja que també s'inclou la DUM, els taxis, etc.

Per tant, el problema de Barcelona es passaria als accessos, i per tant, caldrà coordinar aquestes mesures amb la resta de l'àrea metropolitana i assegurar una graduació contínua de la regulació, ja sigui a través d'una gestió variable del límit de velocitat o amb mesures de ramp-metering que dosifiquin el flux per tal de reduir els efectes negatius de la mesura que hem comentat.

Per què aquesta mesura tingui futur, cal mirar les alternatives a l'ús actual del vehicle. Si ens fixem en els viatges intermunicipals en transport públic, veiem que aquest no és competitiu en temps, i en el cas carpooling, aquest és difícilment compatible amb els (variats) horaris personals.

Això ens indica que difícilment es podrà reduir de forma significativa el nombre de cotxes entrant a Barcelona disposant dels esmentats plans de park&pools i park&rides. Per tant, caldrà reforçar els serveis de transport públic (bus i rodalies, de

Renfe i FGC) en els corredors d'accés a BCN, particularment al llarg de la xarxa de park&rides, per tal de maximitzar l'efectivitat de la mesura.

Incrementar el transport actiu en alguna zona, reconvertint carrils de circulació a carrils bici.

Aquesta mesura només tindrà beneficis per als que ja són usuaris del transport actiu, ja que no garanteix un canvi modal que redueixi la contaminació. També caldrà senyalitzar aquests carrils bici ad-hoc i temporals amb cons o amb algun altre sistema per tal d'assegurar la seguretat viària de tots els usuaris d'aquests carrils. Per tant, a aquesta mesura s'ha qualificat amb una efectivitat "baixa".

Per altre banda, la reducció de carrils de circulació podria causar congestió addicional en hora punta i el conseqüent efecte spillover. Si no es planifica bé (regulant l'oferta de carrils a la demanda potencial de bicicletes), es pot penalitzar la DUM, els taxis i el propi transport públic, fent que la mesura tingui més efecte negatiu que positiu en referència a la reducció d'emissions.

Mesures de promoció del transport públic.

En tractar-se d'una mesura puntual, s'interpreta com reforç de la freqüència de l'actual servei, que seria negatiu per les emissions al haver-hi més vehicles en circulació. Aquesta mesura també preveu un increment de velocitat comercial per disminució de trànsit i per un possible "pla semafòric de prioritització al TP", i menciona la possible gratuïtat del TP.

Per una banda, la gratuïtat puntual del TP només és positiva per als usuaris esporàdics del transport públic, ja que els habituals tenen abonaments i per tant, una bonificació puntual no farà que valorin millor el servei. A part, aquesta gratuïtat del servei no garanteix un canvi modal que redueixi la contaminació a llarg termini, ja que un cop eliminada, aquests usuaris possiblement tornaran al vehicle privat.

També s'hauria de plantejar l'increment de la freqüència ja que aquest no és sinònim d'increment de les prestacions, ja que es pot produir un increment del fenomen del bus bunching o parades de bus congestionades, etc. De cara a les mesures permanents, calen mesures de gestió i increment de velocitat comercial per a fer el bus competitiu comparat amb la velocitat de circulació dels vehicles privats, que sí que seria un factor determinant per al canvi modal.

En aquest sentit, un possible "pla semafòric de prioritització al TP" podria augmentar la velocitat comercial del TP i fer-lo més competitiu, en detriment del trànsit i la DUM (s'assumeix que el taxi podria seguir la regulació semafòrica del TP). De fet, aquestes mesures haurien de ser permanents, ja que si que podrien ser un motiu per al canvi modal, deixant de banda la gratuïtat, que podria provocar problemes financers. Per tant, hem qualificat l'efectivitat d'aquesta mesura com a "Baixa".

Com hem dit anteriorment, els usuaris habituals no podran beneficiar-se a curt termini (només amb la futura T-Mobilitat) de la gratuïtat del transport públic, i crearà un greuge entre aquests i turistes i usuaris puntuals o esporàdics seran els beneficiats.

De cara a les mesures permanents, es pot fomentar que els vehicles de transport públic siguin purament elèctrics per evitar l'increment de les emissions.

Tenint en compte que Barcelona és actualment un laboratori per autobusos elèctrics dins els projectes europeus ZEEUS i ELIPTIC, no sembla absurd que la flota de vehicles amb motor de combustió sigui substituïda per vehicles elèctrics en un futur no molt llunyà.

Regulació específica d'aparcament per a no residents.

Pel que fa als efectes d'aquesta mesura, és important veure que si no es permet aparcar a les zones blaves i verdes (on-street) a usuaris no residents o si es tarifa molt, la demanda limitarà la mobilitat no imprescindible (baixant les emissions), i per contra, crearia un increment de la demanda i del negoci dels aparcaments off-street que podria compensar els efectes de reducció del transit produït per aquesta mesura. Per tant, aquesta mesura es qualifica com a efectivitat "mitjana".

Aquesta regulació també estaria afectada l'efecte spillover de trànsit "paràsit" a la cerca d'aparcament (amb altes emissions de contaminants), o bé aparcaments esporàdics curts en carrils de circulació o en xamfrans i zones C/D per a fer gestions (doble filera, etc.), afectant al trànsit (vehicles privats, taxis, DUM).

Específicament, es veu positiu l'increment tarifari a vehicles de baixa ocupació i/o contaminants, però també caldria un bonus econòmic o incentiu per a vehicles privats d'alta ocupació no residents i d'una determinada etiqueta ambiental (vehicles més nets) per tal d'incentivar aquesta bona praxis.

Regulació de la circulació de taxis en buit en les zones més castigades per la contaminació.

Si ens fixem en el comportament dels taxis, aproximadament el 50% del temps en circulació és en buit, i per tant, a l'interior de les ciutats, les emissions de la circulació en buit poden ser significatives (la flota actual és de 10.000 llicències de taxis a Barcelona, amb flota similar degut a que el descans setmanal es pot compensar amb la rotació d'alguns taxis). Per tant, es qualifica com a efectivitat mitjana-baixa.

Però aquesta mesura comporta dificultats de control per diferenciar quan un taxi circula buit “buscant carrera” o quan un taxi va buit a recollir un client concret ja concertat.

Es poden crear grans punts d'emmagatzematge de taxis en buit (parades de taxi). Actualment molts taxis ja estan afiliats a radioemissores i desenvolupen política de dispatching, no del hailing.

Tot i això, costarà d'aconseguir l'aprovació del sector del taxi, que seria l'única manera que aquesta mesura fos efectiva.

Prohibir càrrega i descàrrega i aturada dels busos discrecionals de 7h a 11h.

Per tal de poder aplicar aquesta mesura caldrà implementar mecanismes de control, tant per regular l'àrea de C/D de la DUM com dels llocs turístics i hotels claus per al bus discrecional. Aquesta mesura pot tenir una efectivitat més limitada que la de taxis en buit, per tant, aquesta mesura es qualifica com a efectivitat “baixa-mitjana”.

L'efecte negatiu és que pot afectar la competitivitat del teixit empresarial i comercial en aquests dies d'episodi, i per tant, seria convenient que aquest tipus de mesures no fos puntual sinó permanent, per tal de que la DUM s'adaptés a aquest nou horari i no es perjudiqués al comerços.

També és possible que apareixi l'efecte spillover dels autocars discrecionals i turístics per desconeixement de la restricció per episodi o bé per "calendari" o "prepagament" de les visites turístiques.

Per tant, és complex de gestionar amb l'actual model econòmic de Barcelona i la inexistència d'altres alternatives de mobilitat per a aquests desplaçaments concertats.

Circulació matricules parells o senars.

Per a evitar greuges, aquesta mesura caldria aplicar-la també a taxis i DUM (malgrat la seva dificultat a curt termini). Aquesta mesura té una qualificació d'efectivitat elevada a curt termini.

Aquesta mesura és una discriminació "cega" ja que no considera l'efecte de cada vehicle, és a dir, no discrimina per eficiència. Tampoc considera si les famílies tenen més d'un vehicle, que per tant, faria que aquesta mesura no els afecti. És una mesura dràstica (el 50%) que ha d'estar molt justificada, per això caldria una previsió de l'episodi, és a dir, quin rang superarem el llindar de contaminació de l'episodi, ja que no és el mateix arribar a $205 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de NO_x durant un dia que a $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durant una setmana, i en funció del gradient, el rang i el període de superació del llindar

d'episodi, es podria regular aquesta restricció amb % menors de vehicles afectats, limitant l'ús dels vehicles que acabin en 2 dígit tenim una reducció del 20% del trànsit, o a 3 dígit tenim el 30%, etc.

També hem de tenir en compte que aquesta mesura tindria efectes i problemes de control diferents segons els usuaris als que afecti, és a dir, del vehicle privat, taxi o DUM

En el cas dels usuaris de vehicle privat és possible l'efecte spillover per compra d'un segon vehicle amb matrícula diferent a la del primer (a Llatinoamèrica s'ha implantat un "mercat negre" de matrícules de vehicles). Aquest segon vehicle podria arribar a ser d'una categoria ambiental inferior al primer per disponibilitat de renda, ja que al tractar-se d'un vehicle de segona mà el més probable és que sigui més antic que l'actual. A mig termini l'usuari també buscarà burlar aquesta prohibició, ja les famílies usuàries del vehicle privat muntaran estratègies entre els diferents vehicles familiars i matrícules per a deixar sense efecte la restricció. També es possible que es mantinguin els vehicles més vells (aparcats on sigui) per a poder-los fer servir durant els episodis. L'efectivitat d'aquesta mesura decreix amb el temps i podria incrementar també l'antiguitat del parc mòbil circulant.

Pel que fa als, taxis, equival a dir que un taxista no pot treballar la meitat dels dies amb episodi. Per una banda, si els taxis són excepció a aquesta mesura, no es traurà cap benefici ambiental d'aquest sector. Per altre banda, si la mesura s'aplica al taxi, demanaran poder aplicar tarifes molt més altes per a garantir la rendibilitat del sector, la qual cosa tindrà una lectura negativa per part dels usuaris o clients d'aquest servei, ja que tindran pitjor servei (més temps d'espera) amb tarifes més elevades (és

possible que la circulació sigui més fluida en hora punta guanyant velocitat comercial i suavitzant l'impacte de la pujada de tarifes per quilòmetre). També es preveu que el sector farà servir els vehicle en dia de descans ($1/7 = 14,3\%$), reduint l'efectivitat de la mesura.

Per últim, per a la DUM la mesura afectarà als transportistes que tenen compromesos els lliuraments per aquell dia (i amb les tarifes pactades); per tant caldria focalitzar els esforços ambientals en els receptors (botigues o ciutadans) o carregadors (fabricants) per a fomentar pràctiques logístiques compatibles amb objectius mediambientals (limitant, per exemple, la política “just in time” o “stock zero”). De cara a les mesures permanents, es poden desenvolupar polítiques de cooperació entre transportistes com Multi-joint Carrier Deliveries (lliurament a una mateixa botiga de productes de diversos proveïdors, com ja fa el sector farmacèutic des de fa decennis), plataformes logístiques (públiques) de microdistribució (rendibles per a cobrir els costos d'operació però cal aportació / subvenció inicial de l'administració sobre els costos fixos de la terminal per a garantir el model de negoci) o la DUM nocturna que s'ha començat a aplicar a altres ciutats i permet l'ús de vehicles més grans degut a la major facilitat de moviment pel menor transit a les nits.

Reducció de la velocitat de les vies principals a 30 km/h (PM_x)

Aquesta mesura té una fàcil implementació amb “plans semaforics per PM_x o SV”. És flux discontinu de trànsit amb semàfors que cal mesurar abans i després de la implementació de les mesures. Com a alternativa, es pot afavorir ones verdes per evitar les aturades i posteriors acceleracions en semàfors, sempre garantint condicions

de circulació segures a una velocitat màxima de 50 km/h. Per tant, li donem una qualificació d'efectivitat "baixa"

Aquesta mesura té dificultats de control i el possible efecte spillover augmentant les emissions de NO_x o àdhuc PM_x amb stop&go addicional. També cal tecnologia per a fer un seguiment dels vehicles i controlar la seva velocitat que encara no s'ha aconseguit atès a l'exemple de les autopistes i carreteres on el control és més fàcil i no s'aconsegueix.

Mesures preses per la Generalitat

No només l'Ajuntament de Barcelona ha publicat les mesures en cas de episodi, sinó que també la Generalitat ha publicat una sèrie de restriccions que s'aplicaran progressivament i que es basa en la prohibició de circulació dels vehicles més contaminants.

En el cas de Barcelona la restricció afectarà l'espai delimitat per la Zona de Baixes Emissions Barcelona, corresponent al terme municipal de Barcelona excepte la Zona Franca-Industrial i el barri de Vallvidrera, Tibidabo i les Planes. En el cas de la conurbació de Barcelona (Zona de Baixes Emissions Àmbit40), la restricció afectarà a la circulació per les vies de titularitat del Servei Català de Trànsit dins l'àrea formada per 40 municipis.

L'Àmbit 40 és una delimitació territorial que inclou 40 municipis de la conurbació de Barcelona declarats Zones de Protecció Especial de l'Àmbient Atmosfèric, veure Fig. 7. La finalitat prioritària és protegir la salut dels seus 4,3 milions

d'habitants, així com el medi ambient, mitjançant l'adopció de mesures conjuntes que s'aplicaran a tota l'àrea. Paral·lelament, els municipis de l'Àmbit 40 podran establir altres mesures particulars amb el mateix objectiu de millora de la qualitat de l'aire. També s'estableix la Zona de Baixes Emissions de Barcelona correspon a l'àmbit municipal, exceptuant la Zona Franca-Industrial i el barri de Vallvidrera, Tibidabo i les Planes.



Fig. 7. ZBE Àmbit 40 i ZBE Barcelona. Font: Ajuntament de Barcelona.

Aquestes mesures tindran una implantació només per episodis aplicada en primera instància, i en 3 horitzons s'anirà endurant la restricció permanent dels vehicles.

A partir de l'1 de Desembre de 2017

En aquesta data és quan es començaran a aplicar les mesures en cas d'episodi (valors límit indicats anteriorment). En cas d'episodi de contaminació, les furgonetes

anteriors a Euro I (matriculades abans de 1994) i els turismes Euro I i anteriors (matriculats abans de 1997) no podran circular dins la Zona de Baixes Emissions de l'Àmbit40.

Dins la Zona de Baixes Emissions de Barcelona la mesura afectarà els turismes sense etiqueta de la DGT, que nosaltres em categoritzat com etiqueta A o vermella, (vehicles de gasolina anteriors al 2000 i dièlsels d'abans del 2006) i a les furgonetes anteriors a Euro I (matriculades abans de l'1 d'octubre de 1994). Les restriccions estaran vigents de 7 del matí a 8 de la tarda en dies laborables. Queden exempts de manera permanent els vehicles de persones amb mobilitat reduïda, els serveis d'emergències (policia, bombers, ambulàncies) i els serveis essencials (mèdic, funerari). Queden exempts durant el 2017 les motos, els camions, els autocars, els autobusos i les furgonetes Euro I, Euro II i Euro III.

A partir de l'1 de gener de 2019:

A partir d'aquesta data es començaran a aplicar els primeres mesures permanents en la restricció de circulació. En aquesta primera data, les furgonetes anteriors a Euro I (matriculades abans de 1994) i els turismes Euro I i anteriors (matriculats abans de 1997) no podran circular els dies entre setmana a tota la zona de l'Àmbit 40.

A partir de l'1 de gener de 2020:

El segon horitzó, estableix la prohibició permanent de circulació dins la Zona de Baixes Emissions de Barcelona dels vehicles sense etiqueta de la DGT (gasolina anteriors al 2000 i dièlsels d'abans del 2006). Per a dies feiners de 7 del matí a 8 de la tarda.

A partir de l'1 de gener de 2025:

Prohibició permanent de circulació en els municipis que integren l'Àrea Metropolitana dels vehicles sense etiqueta de la DGT (de gasolina anteriors al 2000 i dièlsels d'abans del 2006).

Altres mesures

A part d'aquestes mesures, també hi ha altres actuacions indirectes que involucren a les diferents administracions. Entre aquestes actuacions, les administracions es comprometen a informar i sensibilitzar la ciutadania sobre la necessitat de modificar els hàbits de mobilitat per a la disminució de les emissions i la millora la qualitat de l'aire, amb l'objectiu de preservar la salut de les persones i el medi.

Especialment en cas d'episodi ambiental, es recomanarà la disminució dels desplaçaments no obligats, evitar les hores punta i apostar pel transport públic enfront del vehicle privat.

Per tal de contribuir a disminuir la congestió del transport públic a les hores puntes, la Generalitat es compromet a facilitar, en la mesura del possible, la flexibilitat horària del seu personal durant els episodis ambientals.

També s'incentivarà la renovació del parc de vehicles amb ajuts i bonificacions en els peatges, per substituir-los progressivament per vehicles de baixes emissions, es promourà el canvi de flotes en les administracions públiques, i la creació de punts de recàrrega d'elèctrics, entre d'altres.

L'última mesura va relacionada amb la incentivació de l'ús del transport públic. En aquest sentit, es crearà una Targeta verda metropolitana que donarà dret a 3 anys de transport públic gratuït per a tots els serveis de transport de l'ATM. Se'n podran beneficiar aquelles persones de l'AMB que donin de baixa i desballestin un vehicle lleuger dièsel fins a "Euro III" (fabricats abans de 2005), o benzina o gas fins a "Euro I" (fabricats abans de 1996) i motos tipus pre-Euro o Euro I, i que no adquireixin cap vehicle nou durant la vigència de tres anys de la Targeta Verda. Els municipis de l'Àmbit-40 que no siguin beneficiaris de la Targeta Verda Metropolitana es podran afegir a la nova taxació social i ambiental.

Analitzant les mesures preses per la generalitat, podem apreciar un punt molt positiu, que és la creació de l'Àmbit 40. Aquesta zona avarca gran part de l'AMB, i per tant, també els afectarà per moviments a l'àrea més propera a la seva residència i no només als desplaçaments a Barcelona, afectant també als desplaçaments ocasionals.

Un altre punt positiu és la progressivitat d'aplicació de les mesures que donarà temps als usuaris a adaptar-se a les mesures. També trobem positiva la destinació d'ajudes i beneficis a la renovació de la flota de vehicles, però caldria posar l'accent en les famílies amb rentes més baixes per tal de no penalitzar-los en accés.

Centrant-nos en la T-Verda, creiem que aquesta no ha plantejat correctament qui seran els beneficiaris, ja que va destinada al propietari del vehicle, i en molts casos el vehicle transporta diversos passatgers, però només es veuran recompensats amb una targeta. Per tant, creiem que la targeta hauria de ser familiar per tal que se'n pugui beneficiar la unitat familiar. També caldrà tenir present el nombre de vehicles

que té cada família, ja que es pot donar el cas que tinguin diversos cotxes, i en donin de baixa algun que no s'utilitzi per així beneficiar-se de la targeta.

4. Metodologia

Càlcul d'emissions

Per poder determinar els efectes de les mesures per reduir les emissions generades a una ciutat pels vehicles a motor és important definir una formula amb la que poder obtenir uns resultats quantitatius, i d'aquesta manera poder comparar-los per poder optimitzar la solució.

Les emissions generades per un vehicle es poden calcular d'una manera molt simple multiplicant la distancia recorreguda per un factor d'emissions (FE) del vehicle, relacionat amb les emissions unitàries de cada vehicle.

La distancia recorreguda és una variable pròpia de la zona concreta d'estudi. Aquest paràmetre depèn de la densitat de les ciutats, l'àrea d'influència dels pols d'atracció de demanda, les infraestructures disponibles o la riquesa de la població. Això fa difícil trobar ciutats similars. A part, les administracions poden influir-hi amb les mesures relacionades amb la mobilitat que duguin a terme, així com seva planificació d'infraestructures.

Pel que fa a les emissions unitàries, estan afectades per múltiples factors que tenen molta rellevància. L'element principal que determina aquest factor és el motor del vehicle. Les emissions generades estan marcades amb la normativa EURO vigent en el moment de fabricació del vehicle. Aquesta normativa limita les emissions dels vehicles segons el seu combustible i el tipus de vehicle al que vagi destinat. Un altre paràmetre que afecta a aquesta variable és la velocitat de circulació, ja que tant la

generació de NO_x com la de PM_{10} tenen una gran relació amb la velocitat de circulació, com hem comentat anteriorment.

Per tant, la generació d'emissions per un vehicle es pot calcular de la següent manera:

$$E(v) = FE(v) * distància$$

Un cop sabem que genera un vehicle ho hem de extrapolar al conjunt de la ciutat. Per tant, ara tindrem un sumatori de tots els vehicles de la ciutat, de manera que la formula anterior queda de la següent manera (per simplificar al notació, definirem la distancia com d):

$$E(v) = \sum_i FE(v)_i * d_i$$

En aquesta última fórmula hem considerat tots els vehicles individualment (considerant i cotxes), però saber què fa cada vehicle individualment i el FE propi de cada cas és impossible de saber amb les dades disponibles actualment, per tant, hem d'agrupar els vehicles en grups segons el tipus de vehicles i les el FE de cada grup, en aquest cas segons la norma EURO que segueixen i el tipus de combustible. De manera que la formula queda de la següent manera:

$$E(v) = \sum_i Q_i * FE(v)_i * d_i$$

En aquest cas tenim i grups de vehicles agrupats segons la normativa EURO, el tipus de vehicle i combustible. El factor Q_i fa referència al nombre de vehicles que pertanyen a cada grup, $FE(v)_i$ al factor d'emissions de cada grup i per últim la distància recorreguda per cada grup.

També és fàcil veure que dins de cada grup de vehicles dintre de categoria EURO hi ha diferents tipus de vehicles com poden ser camions, cotxes o motocicletes. Per això, hem de introduir un nou sumatori com podem veure a la següent fórmula:

$$E(v) = \sum_{i,j} Q_{i,j} * FE(v)_{i,j} * d_{i,j}$$

En aquesta última fórmula tenim j grups dins de cada grup i , que tenen unes característiques pròpies definides pels paràmetres FE i d . També cal mencionar el fet que tant el factor FE com el resultat de E depenen de v , la velocitat. Això és degut a que la velocitat a la que circulen els vehicles té molta importància en les emissions, ja que pot suposar una variació de més del 100% si comparem els resultats obtinguts entre les velocitats més i menys òptimes.

D'aquesta fórmula veiem que tenim dos elements que ens poden permetre reduir les emissions generades. Una manera és actuar sobre el factor d'emissions i l'altre actuar sobre el nombre de vehicles i la distància recorreguda.

Per reduir el FE tenim diverses opcions que suposen un major o menor efecte sobre les emissions.

La idea més obvia és la reducció de consums i emissions dels motors dels vehicles. Això està molt relacionat amb la tecnologia dels motors de combustió, i per tant, una reducció de la cilindrada provocaria una reducció del consum, i si també es millora la eficiència de la combustió, es reduirien les emissions de contaminants. Aquest concepte va molt relacionat amb les normatives euro, per tant, l'aplicació d'aquesta idea consisteix en la substitució de vehicles amb normes antigues per vehicles amb normes més modernes, que per tant, generaran menys emissions. Per

exemple, la substitució d'un turisme dièsel EURO III per un EURO V suposaria passar de generar 1,13 grams per kilòmetre de NO_x a generar 0,18 grams per kilòmetre, el que suposa un 84% menys d'emissions. Per poder fer això cal una renovació del parc mòbil circulant incitant als usuaris a realitzar aquest canvi.

Com podem veure, és una mesura efectiva si volem reduir les emissions a llarg termini, i pot aconseguir reduir les emissions encara que el transit augmenti degut a que les emissions es redueixen dràsticament. Però això té un gran efecte sobre els usuaris amb vehicles antics, ja que la compra d'un nou vehicle és una despesa considerable que no tots els usuaris poden afrontar, per tant, sense ajuts per a realitzar aquest canvi serà difícil realitzar aquest canvi sense perjudicar als usuaris més vulnerables.

En aquest sentit, hi ha una segona opció amb millors resultats que el citat anteriorment, la utilització de vehicles híbrids o elèctrics. Aquests, no generen cap tipus d'emissió mentre circulen en el cas dels elèctrics i dels híbrids a velocitats inferiors als 50 km/h si tenen les bateries carregades. Per tant la renovació del parc mòbil cap a aquest tipus de vehicles seria encara millor.

S'ha de tenir en compte, que els vehicles elèctrics encara estan molt limitats per l'autonomia i no tenim una infraestructura de carregadors prou potent per poder absorbir un augment molt elevat d'aquest tipus de vehicles. Per tant, per poder considerar aquesta opció com a preferent necessitem una forta inversió en punts de recàrrega.

Aquesta mesura té encara més avantatges que el cas anterior però té els mateixos inconvenients, afegint el problema de la recàrrega dels vehicles, que

suposaria un forta inversió, ja sigui per l'administració com per els fabricants d'aquests vehicles si es vol assegurar una bona cobertura de recàrrega.

Una altre punt que fa que els consums a dins de les ciutats siguin majors que en vies més ràpides és el que anomenem *stop&go* provocat pels semàfors. Per tant, la implantació de un bon pla semaforic que potenciï una velocitat uniforme és una bona estratègia per tal de reduir els consums dels vehicles, i per tant, també de les emissions. Relacionat amb això, també trobem la velocitat de circulació, ja que si aconseguim augmentar la velocitat mitja a dins de la ciutat, aconseguirem minimitzar les emissions generades, i per tant, potenciar els efectes del pla semaforic.

Pel que fa a l'efectivitat d'aquesta mesura, el seu efecte no és molt gran a curt termini, però amb el temps, pot suposar reduir grans quantitats de contaminants, així com reduir les concentracions en les zones més congestionades de la ciutat. Econòmicament, no suposa una despesa elevada per l'ajuntament, per tant, la seva aplicació seria factible. Per això, tot i no tenir grans efectes, seria convenient aplicar-la degut al seu baix cost econòmic.

En resum, per tal de millorar el FE tenim dues idees principals, la renovació del parc mòbil circulant i l'aplicació d'un bon pla semaforic. Tenint sempre en compte que per optimitzar-ho necessitem invertir en carregadors per vehicles elèctrics i assegurar una velocitat elevada.

L'altre opció per reduir les emissions és reduir el segon terme, el nombre de veh-km. Per fer-ho tenim varies opcions com en el cas del primer terme.

La primera opció és augmentar l'ocupació dels vehicles. Actualment els vehicles que entren a Barcelona tenen una ocupació molt baixa, molt propera a un ocupant.

Això ho podem aconseguir mitjançant la potenciació del *carpooling*, de manera que es comparteixi el vehicle i d'aquesta manera reduir també el nombre de vehicles.

Aquesta mesura té un cost mínim per la administració, ja que no ha de adaptar cap infraestructura ni necessita cap tipus de manteniment, però necessita incentius per la seva potenciació, ja sigui en forma de subvencions o en forma de descomptes en alguns costos dels vehicles (impostos, aparcament...), ja que per els usuaris la necessitat de coordinació amb la resta d'usuaris del vehicle suposa un cost molt elevat, i per tant, es necessita incorporar incentius perquè l'ús del *carpooling* sigui rellevant.

La segona opció, és la promoció de modes de transport col·lectiu, com el transport públic. S'ha de tenir en compte que és difícil aconseguir un traspàs d'usuaris del vehicle privat al transport públic degut als inconvenients relacionats amb la llibertat de moviment que suposa el vehicle privat, però si es vol reduir el nombre de vehicles és imprescindible tenir un bon sistema de transport col·lectiu amb un sistema de tarifes competitiu per tal de poder oferir una bona alternativa al transport privat.

Un dels sectors que més circula per les ciutats és el de la distribució urbana de mercaderies (DUM), per tant, el desenvolupament d'infraestructures logístiques de consolidació tindria grans efectes en la reducció de *veh-km*. L'objectiu d'aquests centres és la de consolidar totes les entregues a un establiment en un sol vehicle, d'aquesta manera, tindrem menys vehicles que van a realitzar entregues al mateix lloc. Si això es complementa amb sistemes d'entrega d'última milla amb vehicles elèctrics o de tracció humana per fer entregues més urgents es reduirien en gran mesura les emissions generades per la distribució de mercaderies.

Un altre opció per reduir el nombre de vehicles és la introducció d'un peatge urbà, de manera que per entrar dins d'una zona determinada s'hagi de pagar una taxa. Els peatges urbans actuen com a dissuasoris de l'entrada, de manera que al incrementar els costos els conductors evitaran entrar a la zona o buscaran altres modes de transport. Aquesta mesura és efectiva i relativament econòmica, tot i que els sistemes de taxació automàtics son costos, i requereixen d'una inversió inicial elevada, que es podria compensar amb els ingressos per a taxa.

Com hem vist, hi ha diversos mètodes per tal de reduir els factors individualment, però una actuació que tingui com a objectiu reduir els dos factors a la vegada seria més efectiu per tal de aconseguir reduir el nombre d'emissions.

Una mesura bona mesura en aquest sentit és l'aplicació d'un peatge ambiental. Aquest té un funcionament semblant al del peatge urbà però incorpora reduccions del cost per als vehicles menys contaminants, considerant exempcions per als vehicles elèctrics, i també reduint el cost per els vehicles amb alta ocupació. Aquest peatge també té la capacitat de taxar als vehicles de la DUM, de manera que es podria potenciar la reducció del nombre de parades i la disminució dels kilòmetres recorreguts.

Com podem veure, barreja actuacions dels dos grups de mesures, i per tant, amb una sola actuació apliquem els beneficis de varies mesures en una sola. Per tant, creiem que desenvolupar un peatge ambiental és la mesura més efectiva a llarg termini per tal de reduir les emissions.

Per poder determinar les emissions és molt important definir correctament els *FE* del parc mòbil, així com el nombre de vehicles i els kilòmetres que recorren per tal

de tenir un valor de les emissions i variar-lo depenent de la tarifa que apliquem a cadascun dels grups.

Efectes sobre la demanda

Per conèixer l'efecte dels peatges sobre els usuaris de la via apliquem la teoria de l'elasticitat de la demanda, on a partir d'una elasticitat podem conèixer els efectes que té la variació del cost del trajecte. La fórmula bàsica de l'elasticitat és la següent:

$$E = \frac{\% \text{ Variació Demanda}}{\% \text{ Variació Cost}} = \frac{\Delta Q / Q}{\Delta C / C}$$

En el nostre cas el que volem conèixer és la variació de la demanda a partir de les altres variables, per tant, la formulació quedarà de la següent manera:

$$\Delta Q = E * \frac{\Delta C}{C} * Q_i$$

Seguidament, si definim l'increment com a valor final menys valor inicial obtenim la següent fórmula per conèixer la demanda final:

$$Q_f = E * \frac{C_f - C_i}{C_i} * Q_i - Q_i = \left(E * \frac{C_f - C_i}{C_i} - 1 \right) * Q_i$$

Per últim, si definim l'increment del cost com la taxa a pagar pels usuaris τ , obtenim la següent fórmula:

$$Q_f = \left(E * \frac{\tau}{C_i} - 1 \right) * Q_i$$

A partir d'aquí, veiem que les variables de les que depèn la quantitat final de vehicles que circulen per la via són la taxa τ , el cost inicial, és a dir, el cost de moure el vehicle, incloent tots els costos, l'elasticitat i el flux inicial de vehicles.

D'aquesta formula, per tant, queda definir el cost. Aquest estarà compost dels costos del mitjà de transport més el cost del moviment, entre les que s'inclou el temps de trajecte. La fórmula queda de la següent manera:

$$C = C_v * d + t * C_t + \tau$$

Sabent que el temps de trajecte depèn de la distància recorreguda i de la velocitat de circulació, la formula que tenim és la següent:

$$C = C_v * d + t * \frac{d}{v} + \tau$$

És important indicar que al valor del temps seria interessant incloure un valor de millora del temps de trajecte degut a la reducció del transit que suposa l'aplicació de la taxa, però em cregut convenient no aplicar-ho, ja que al no tractar-se d'un peatge físic no suposa un coll d'ampolla que faci incrementar el temps de viatge, i si ens fixem en la reducció de la congestió, aquesta no serà significativa degut a que no canviarem les pautes de comportament dels usuaris, i per tant, les reduccions del temps de viatge seran mínimes.

També volem indicar, que l'objectiu d'aquest estudi no es reducció de la congestió de la ciutat, sinó que aquesta és una conseqüència de la taxa aplicada, i que si es du a terme una renovació del parc mòbil, podríem aconseguir una reducció de les emissions amb el mateix volum de transit.

S'ha de dir, que l'única variable sobre la que tenim control és la taxa, ja que la resta de variables estan determinades pel sistema. Això vol dir que haurem de determinar quin és el seu valor de manera que ens ajustem el màxim possible a la realitat de la nostre zona d'estudi, és a dir, Barcelona.

Pel que fa a l'elasticitat de la demanda, s'hauria de fer un estudi concret de zona d'influència del peatge per poder determinar-la, ja que intervenen molts factors, com poden ser el motiu del viatge, el nombre d'etapes, els kilòmetres recorreguts... que fan que sigui molt difícil d'establir un valor a partir de comparatives entre altres estudis de zones semblants.

Un altre motiu que fa difícil determinar-la és el fet que la majoria d'estudis tenen com a objecte d'estudi les autopistes, on tenim poques alternatives al peatge i molt definides. En canvi, en una ciutat tenim moltes alternatives diverses i molts condicionants que fan que determinar un valor amb exactitud sigui molt difícil.

Si mirem el cost del vehicle és relativament fàcil conèixer el cost unitari del vehicle, ja que existeixen informes que indiquen el cost unitari dels vehicles a partir dels preus dels diferents components que necessites un manteniment (pneumàtics, lubricant...), el cost de l'amortització, combustible...

S'ha de dir, que aquest cost és un cost mig i per tant, ens donarà una aproximació bastant real si l'apliquem al conjunt del parc mòbil de la ciutat. Per tant, només dependrà del quilometratge mig del usuaris de la zona afectada pel peatge.

Al cost del vehicle també tenim que sumar el cost del temps de trajecte, ja que en les societats desenvolupades pot tenir un valor elevat, especialment quan el motiu del desplaçament és anar a treballar o a l'escola. Com a mitja el valor del temps a Barcelona estaria al voltant dels 9,4€/h (Álvarez San-Jaime & Cantos Sánchez, 2009).

L'última variable és el trànsit inicial a la zona d'estudi. Aquesta, és una dada relativament fàcil d'aconseguir, ja que les grans ciutats fan controls d'aforament per

tal de conèixer el transit i així tenir una idea aproximada del desgast dels carrers, així com saber quins són els carrers més transitats.

El problema d'aquestes dades és que ens donen valors diaris, fet que fa que no puguem veure un la variació de transit al llarg del dia. Tot i això, hi ha estudis que determinen la corba d'intensitats al llarg del dia i determinen un factor d'hora punta que ens pot ajudar a determinar aquestes variacions.

Efectes sobre la demanda y emissions

Com que la nostre idea és relacionar el peatge amb les emissions, aplicarem una taxa diferent a cada tipus de vehicle, per tant, tindrem un Q diferent per cada grup de vehicles, i per tant, la formulació de les emissions quedarà de la següent manera:

$$E(v) = \sum_{i,j} Q_{i,j} * FE(v)_{i,j} * \bar{d}_{i,j}$$

Que indicaria la suma del producte del nombre de vehicles per el factor d'emissions, pel nombre mig de kilòmetres recorreguts segons la norma EURO del vehicle i el tipus de vehicle.

Per últim, queda determinar el valor a la taxa. Per fer-ho ens basarem en l'objectiu de reduir un 30% les emissions generades a la ciutat. Per això compararem les emissions que no es generaran pels vehicles que no circularan degut al peatge i a quant correspon aquest 30% de les emissions, de manera que el valor de les emissions que no generarem sigui semblant a aquest valor. Per tant, el paràmetre $Q_{(i,j)}$ fórmula anterior correspon al nombre de vehicles que no circularà degut al peatge ($Q_r - Q_f$).

Un cop determinada la formulació queda determinar quina és l'àrea òptima de taxació. Per fer-ho, hem comparat 3 zones diferents aplicant aquesta formulació, de manera que en els 3 casos es reduís un 30% la quantitat de NO_x i PM_{10} generades a la ciutat.

Hipòtesis

Per realitzar aquest càlcul hem utilitzat una sèrie d'hipòtesis per tal de simplificar les variables del problema que definim a continuació:

- Aplicarem una taxa diferent depenent de l'etiqueta ambiental que tingui el vehicle, de manera que els vehicles menys contaminant tinguin que afrontar taxes inferiors.
- La taxa s'aplica per l'entrada no per la sortida.
- La taxa és per l'accés, i per tant, es paga cada vegada que s'entra dintre la zona de taxació.
- L'elasticitat de la demanda la suposem lineal i constant independentment dels costos i del poder adquisitiu de les persones.

També hem definit 4 grups de taxació classificats segons l'etiqueta ambiental que ha desenvolupat la DGT, on dóna 4 tipus diferents d'etiqueta i un últim grup sense etiqueta, que inclou tots els vehicles que no pertanyen a cap dels grups definits. En el nostre cas, he agrupat les dos etiquetes més netes i hem aprofitat la resta de grups.

Després de desenvolupar aquesta idea, hem vist que hi ha una altre possible solució que consistiria en utilitzar les tres zones, de manera que funcionessin conjuntament, és a dir, que amb taxes menors aconseguíssim resultats semblants.

Aquesta nova fórmula es basa en diverses hipòtesis que s'afegeixen a les utilitzades per el cas anterior:

- La distribució dels viatges és uniforme, per tant, hi ha un % de vehicles que no passa la primera frontera, el mateix percentatge no passarà la segona, i a la tercera no passarà aquest percentatge de la primera ni el percentatge de la segona, de manera, que si es reduís un 10% el vehicles a la primera frontera, per la següent voldran passar un 90% dels vehicles que actualment passa, i si a la segona també es redueix un 10%, a la tercera voldrà passar un 80% (reduint el 10% de la primera més el 10% de la segona).
- El cost de la taxa serà diferent per cada zona, incrementant-se a mesura que ens apropem al centre de la ciutat.
- Per evitar el pagament de varies taxes en un dia, s'aplicarà la taxa màxima que hagi de pagar un vehicle, de manera, que hagi de pagar el mateix un vehicle que passi totes les fronteres que el que passi només la frontera de la zona més petita.

Retorn social

Un altre punt a tenir en compte a l'hora d'avaluar els beneficis d'aquest tipus de mesures és el retorn social que obtenim dels ingressos generats per aquestes mesures. Els costos aproximats del sistema de control dels vehicles i del sistema que gestiona els vehicles és de aproximadament uns 200 milions d'euros. En el cas d'Estocolm, els costos de funcionament suposen aproximadament un 28% dels beneficis generats pels peatges (Eliasson, 2009). Per tant, poden destinar el 70% d'aquests beneficis a altres mesures per tal de contrarestar els efectes negatius de la

mesura per als usuaris i, per tant, obtinguem un retorn social. En el cas de Londres, el cost total del sistema suposa un 48% dels ingressos per la taxa (Transport for London, 2008), per tant, podríem dir que Barcelona estaria entre aquests dos percentatge. Podríem dir que Barcelona estaria al voltant del 35% si agafem la mitjana com a vàlida.

Per tant, si agafem com a vàlid aquests 35% de costos operacionals, tindrem disponible un 65% dels guanys per invertir en retorn social. En el cas de Londres, l'any 2007/2008 es van distribuir els beneficis nets de la següent manera:

- Millora de la xarxa de bus, 81,7%
- Plans de millora de la ciutat, 1,5%
- Millora de carreteres i ponts, 9,5%
- Millora de la seguretat vial, 2,9%
- Medi ambient, 1,5%
- Zones peatonals i carrils bici, 2,9%

Aquesta distribució ens pot donar una idea de com repartir els beneficis del peatge urbà en entre els ciutadans, però en el nostre cas podríem incloure més punts.

Un punt molt important, que en el cas de Londres no s'inclou, serien les ajudes als usuaris amb menor poder adquisitiu per tal de facilitar el canvi de vehicle a un més net o les ajudes per subvencionar el transport públic. Un altre punt a tenir en compte seria la inversió en carregadors per vehicles elèctrics, d'aquesta manera, tindríem una xarxa molt més extensa, que permetria l'expansió dels vehicles elèctrics.

Tot i aquests canvis, tindríem una distribució dels beneficis molt semblant a la que presenta Londres, ja que inverteix en canvi modal cap a mitjans de transport més sostenibles, així com per la ciutat millorant les zones peatonals.

Si ens fixem en el cas de Milà amb la Ecopass Area, han destinat els beneficis generats a millora les rutes de existents i crear-ne de noves per tots els mitjans de transports públics de la ciutat (metro, tramvia i autobusos) i també a crear un servei de bicicletes públic, semblant al Bicing de Barcelona. Això posa de manifest que aquest tipus de mesures tenen un retorn social real a part de la reducció directa de les emissions contaminants dels vehicles.

5. Aplicació al cas de Barcelona

Etiqueta ambiental de la DGT

En aquest sentit la Direcció General de Transit (DGT) ha creat un etiquetatge ambiental que ha enviat a tots els propietaris de vehicles per tal de categoritzar tots els vehicles, i així, de pas, indicar als conductors si el seu vehicle és molt contaminant o no.

Com aquest etiquetatge ens sembla un bon inici per categoritzar els vehicles, hem decidit adoptar la seva classificació per aplicar les diferents taxacions del peatge ambiental en estudi.

L'etiquetatge està basat en el tipus de vehicle, que com hem comentat abans torbem les categories L, M, N i altres, juntament amb les seves subcategories, i en la normativa EURO de les diferents tipus de vehicles.

A continuació definirem cadascuna d'aquestes etiquetes publicades al BOE del 21 d'abril de 2016.

- **Cero emissions:**
 - Vehicles L, M1, N1, M2, M3, N2 i N3 classificats en el Registre de Vehicles elèctrics de bateria (BEV), vehicle elèctric d'autonomia extensa (REEV), vehicle elèctric híbrid endollable (PHEV) amb una autonomia mínima de 40 kilòmetres o vehicles de pila de combustible.



Fig. 8. Etiqueta 0 emissions. Font: (Ministerio del Interior, 2016).

- **ECO:**
 - Vehicles M1 i N1 classificats al Registre de Vehicles com vehicles híbrids endollables amb autonomia <40km, vehicles híbrids no endollables (HEV), vehicles propulsats per gas natural, vehicles propulsats per gas natural comprimit (GNC) o gas líquat de petroli (GLP). En tot cas, hauran de complir els criteris d'etiqueta C.
 - Vehicles M2, M3, N2 i N3 classificats en el Registre de Vehicles com híbrids endollables amb autonomia <40km, híbrids no endollables (HEV), propulsats per gas natural comprimit (GNC) o gas natural líquat (GNL). En tot cas, hauran de complir els criteris d'etiqueta C.



Fig. 9. Etiqueta ECO. Font: (Ministerio del Interior, 2016).

- **C:**
 - Vehicles M1 i N1 classificats al Registre de Vehicles com gasolina EURO 4/IV, 5/V o 6/VI o dièsel EURO 6/VI.
 - Vehicles M2, M3, N2 i N3 classificats en el Registre de Vehicles com gasolina EURO VI/6 o dièsel EURO VI/6.



Fig. 10. Etiqueta C. Font: (Ministerio del Interior, 2016).

- **B:**
 - Vehicles M1 i N1 classificats al Registre de Vehicles com gasolina EURO 3/III o dièsel EURO 4/IV o 5/V.
 - Vehicles M2, M3, N2 i N3 classificats en el Registre de Vehicles com gasolina EURO IV/4 o V/5 o dièsel EURO IV/4 o V/5.



Fig. 11. Etiqueta B. Font: (Ministerio del Interior, 2016).

Aquesta classificació no atorga cap categoria als vehicles que no entren a cap d'aquests grups. Per això, per tal de facilitar la notació per la elaboració de l'estudi, hem considerat denominar aquest grup com a etiqueta A.

Parc mòbil de Barcelona

Per fer poder dur a terme aquest estudi, hem hagut de realitzar una sèrie d'hipòtesis per tal de poder obtenir unes dades prou fiables i actualitzades per tal de obtenir uns resultats el més ajustats possibles a la realitat.

El primer pas que hem hagut de dur a terme és la definició del parc mòbil circulant a Barcelona. Per això, a partir de dades obtingudes de les bases de dades de la DGT i l'Ajuntament de Barcelona, hem pogut definir l'antiguitat dels vehicles, així com la quantitat de vehicles gasolina, diesel i amb altres combustibles (GNL, híbrids, elèctrics...).

L'antiguitat s'ha obtingut a partir de les dades del conjunt de l'estat espanyol, ja que és l'única base de dades que indica l'any de la primera matriculació de tots els vehicles que actualment estan matriculats a l'Estat separats segons el tipus de vehicle (turisme, furgoneta, autobús...). Hem cregut que pot ser semblant al parc mòbil de l'àrea metropolitana de Barcelona. Cal dir, que l'últim any disponible és el 2014, pel que hem hagut d'incloure el nombre de vehicles matriculats al 2015 per tal de tenir un nombre suficient de vehicles pertanyents a la categoria EURO VI. Totes aquestes dades han estat obtingudes de la web de la DGT.

Un cop obtingudes aquestes dades, hem hagut de determinar el nombre de furgonetes i camions, ja que en la classificació de la DGT apareixen junts. Per fer això ens hem basat en l'estudi de la caracterització del parc mòbil circulant de Barcelona (Barcelona Regional, 2011), ja que el nombre de camions de gran tonatge serà molt baix en comparació amb el de furgonetes.

Els resultats que mostra aquest estudi ens indiquen que la major part d'aquests vehicles corresponen a la categoria N1, que suposen gairebé el 85% d'aquest tipus de vehicles. Després, en percentatge de vehicles trobem es N2, amb un 7,9%, i després els N3, amb un 7,1%. Aquests percentatges tenen sentit, ja que a Barcelona no entren gaires vehicles de gran tonatge, i sobretot, es concentren als accessos del port.

També hem utilitzat els resultats d'aquest estudi per tal de determinar el percentatge de vehicles gasolina i diesel de cada tipus de vehicle, ja que la distribució dins de la ciutat no segueix la mateixa distribució que el del conjunt del país.

	% Gasolina	% Diesel
Turisme	35,1%	64,6%
N1	6,4%	93,6%
N2	0,0%	100,0%
N3	0,0%	100,0%
Autobús	0,0%	93,7%

Taula 5. Percentatge segons el tipus de vehicle i combustible. Font: (Barcelona Regional, 2011).

Com podem veure a la Taula 5, en els turismes, el percentatge de diesel és superior al de gasolina. Si comparem això amb els percentatges dels vehicles matriculats a Barcelona, veiem que canvia, ja que en aquest cas el percentatge es

favorable als gasolina, però molt proper al 50%. Això ens indica que molts dels vehicles que circulen per Barcelona provenen de fora, que és on el percentatge de diesel és major.

Si mirem les furgonetes i camions, només trobem vehicles de gasolina a la categoria N1, és a dir, a les furgonetes. Això és normal, ja que els vehicles que han de transportar molt pes acostumen a ser diesel per aprofitar el parell motor que ofereixen aquest tipus de motors.

Pel que fa els autobusos, la gran majoria són diesel, però trobem alguns de gas natural, que pertanyen tots a l'Ajuntament de Barcelona.

També podem veure que alguna suma de percentatges no arriba al 100%. Això és degut a la presència de vehicles híbrids, elèctrics o de gas que no computen com a gasolina ni com a diesel.

ANY	VEHICLE										
	TURISME M1		MOTOCICLE	LDV N1 - I		LDV N1 - II		LDV N1 - III		CAMIONS I	VEHICLES
	DIÈSEL	GASOLINA	TA	DIÈSEL	GASOLINA	DIÈSEL	GASOLINA	DIÈSEL	GASOLINA	AUTOBUSO	N2 I N3
1992	EURO I	EURO I	Pre-EURO	Pre-EURO	Pre-EURO	Pre-EURO	Pre-EURO	Pre-EURO	Pre-EURO	EURO I	EURO I
1993	EURO I	EURO I	Pre-EURO	Pre-EURO	Pre-EURO	Pre-EURO	Pre-EURO	Pre-EURO	Pre-EURO	EURO I	EURO I
1994	EURO I	EURO I	Pre-EURO	EURO I	EURO I	EURO I	EURO I	EURO I	EURO I	EURO I	EURO I
1995	EURO I	EURO I	Pre-EURO	EURO I	EURO I	EURO I	EURO I	EURO I	EURO I	EURO I	EURO II
1996	EURO II	EURO II	Pre-EURO	EURO I	EURO I	EURO I	EURO I	EURO I	EURO I	EURO II*	EURO II
1997	EURO II	EURO II	Pre-EURO	EURO I	EURO I	EURO I	EURO I	EURO I	EURO I	EURO II*	EURO II
1998	EURO II	EURO II	Pre-EURO	EURO II	EURO II	EURO II	EURO II	EURO II	EURO II	EURO II	EURO II
1999	EURO II	EURO II	EURO I	EURO II	EURO II	EURO II	EURO II	EURO II	EURO II	EURO III*	EURO III
2000	EURO III	EURO III	EURO I	EURO III	EURO III	EURO II	EURO II	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III
2001	EURO III	EURO III	EURO I	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III
2002	EURO III	EURO III	EURO I	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III
2003	EURO III	EURO III	EURO II	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III
2004	EURO III	EURO III	EURO II	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III	EURO III
2005	EURO IV	EURO IV	EURO II	EURO IV	EURO IV	EURO III	EURO III	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV
2006	EURO IV	EURO IV	EURO III	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV
2007	EURO IV	EURO IV	EURO III	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV
2008	EURO IV	EURO IV	EURO III	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO V	EURO IV
2009	EURO V	EURO V	EURO III	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO IV	EURO V	EURO IV
2010	EURO V	EURO V	EURO III	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO IV
2011	EURO V	EURO V	EURO III	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO IV
2012	EURO V	EURO V	EURO III	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V
2013	EURO V	EURO V	EURO III	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V
2014	EURO VI	EURO VI	EURO III	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V	EURO V
2015	EURO VI	EURO VI	EURO III	EURO VI	EURO V	EURO VI	EURO V	EURO VI	EURO V	EURO V	EURO V
2016	EURO VI	EURO VI	EURO IV	EURO VI	EURO V	EURO VI	EURO V	EURO VI	EURO V	EURO V	EURO V

Taula 6. Categoria EURO segons l'any de matriculació del vehicle.

Amb tot això, només falta assignar la categoria EURO al qual pertanyen els vehicles matriculats cada any. A la Taula 6 es pot veure la categoria EURO que li pertoca a cada vehicle segons l'any de matriculació. Com es pot veure, cada categoria de vehicle té diferents anys de aplicació de les normes, i en particular la norma EURO VI només s'ha desenvolupat per turismes i furgonetes diesel. Les motos són un cas particular, ja que aquestes normatives no es van començar a aplicar fins al 1999, set anys més tard que els turismes. En aquest grup, també es veu que la EURO IV va tardar molt a aplicar-se, ja que és molt recent (2016).

Per acabar amb la classificació dels vehicles, hem assignar l'etiqueta ambiental de la DGT que li correspon a cada tipus de vehicle segons la normativa EURO, per tal de facilitar la categorització, ja que aquesta classificació ja està feta i s'estan distribuint els adhesius als propietaris del vehicles. Aquest últim punt és important, ja que facilita l'aplicació del sistema i així no caldrà enviar a cada propietari l'adhesiu corresponent a cada vehicle.

Etiqueta	% Vehicles
0/ECO	10,1%
C	14,2%
B	33,3%
A	42,4%

Taula 7. Percentatge de vehicles que pertany a cada etiqueta.

Com podem veure a la Taula 7, la majoria de vehicles pertany a la etiqueta A, això és degut a que el parc mòbil de Barcelona és bastant antic, i al fet que la majoria són diesel, tots els anteriors del 2004 estan en aquest grup.

A continuació, trobem l'etiqueta B, que també és molt nombrosa degut a l'antiguitat del parc mòbil, i en aquest cas, perquè inclou els gasolina entre el 2000 i 2004.

A l'etiqueta C trobem un percentatge força baix degut a que les dades de les que disposem són a partir del 2015, i la norma EURO VI està vigent des del 2014, això fa que tinguem pocs vehicles, especialment els diesel (suposen el 13% dels vehicles d'aquest grup), i que durant aquests anys ha baixat la matriculació de vehicles degut a la crisi.

Per últim trobem les etiquetes 0 i ECO, que tenen un percentatge molt elevat respecte al que podríem pensar, ja que no hi ha gaires vehicles d'aquest híbrids o elèctrics (encara que el seu nombre va augmentant cada any). Aquest alt percentatge és degut a que les motos estan incloses i suposen un alt percentatge dels vehicles que es mouen per Barcelona.

Un altre punt important a caracteritzar, són les emissions dels vehicles segons la normativa EURO que segueixen. Un tema que ha agafat rellevància després de l'escàndol sobre les emissions protagonitzat per Volkswagen. Per poder fer-ho, ens hem basat en els resultats obtinguts per l'estudi de la caracterització del parc mòbil circulant a Barcelona, ja que també inclou mesures reals registrades segons la normativa EURO dels vehicles i s'han obtingut uns resultats mitjos per cada grup.

Cal dir, que l'estudi va acabar de prendre mesures al 2008, pel que no tenim referències dels vehicles EURO V i EURO VI, pel que utilitzarem els valors límit imposats per la UE, tot i que sabem que són superiors.

Aquesta última suposició farà que els valors reals reduïts siguin majors que els calculats, ja que les emissions d'aquests vehicles seran superiors a les que suposarem.

Determinació de la zona de taxació

Per poder determinar l'extensió òptima de la zona a tarifar, hem agafat tres zones de referència per tal de comparar els resultats obtinguts i així poder determinar l'extensió òptima. Per poder determinar el volum de transit que entra en a cada zona, hem utilitzat l'aranya del transit de 2011, última disponible al web de l'Ajuntament de Barcelona, on tenim tots els vehicles que passen per cada carrer en un dia feiner.

Hem definit tres zones, que van de més petita a més gran, partint sempre del centre de Barcelona com a referència, i ampliant-la per tal de tenir més influència en el conjunt de la ciutat.

ZBE 1

La primera zona comprèn el centre de la ciutat, i la hem definit com a ZBE 1, que es pot observar a la Fig. 12. Les fronteres estan definides pels carrers Aragó, Marina, Aiguader/Passeig Colon i Paral·lel, on tots els vehicles que entrin dins la zona delimitada hauran de pagar un peatge depenent de l'etiqueta ambiental, entent que els vehicles que circulen per aquests carrers no entren a la zona de taxació.

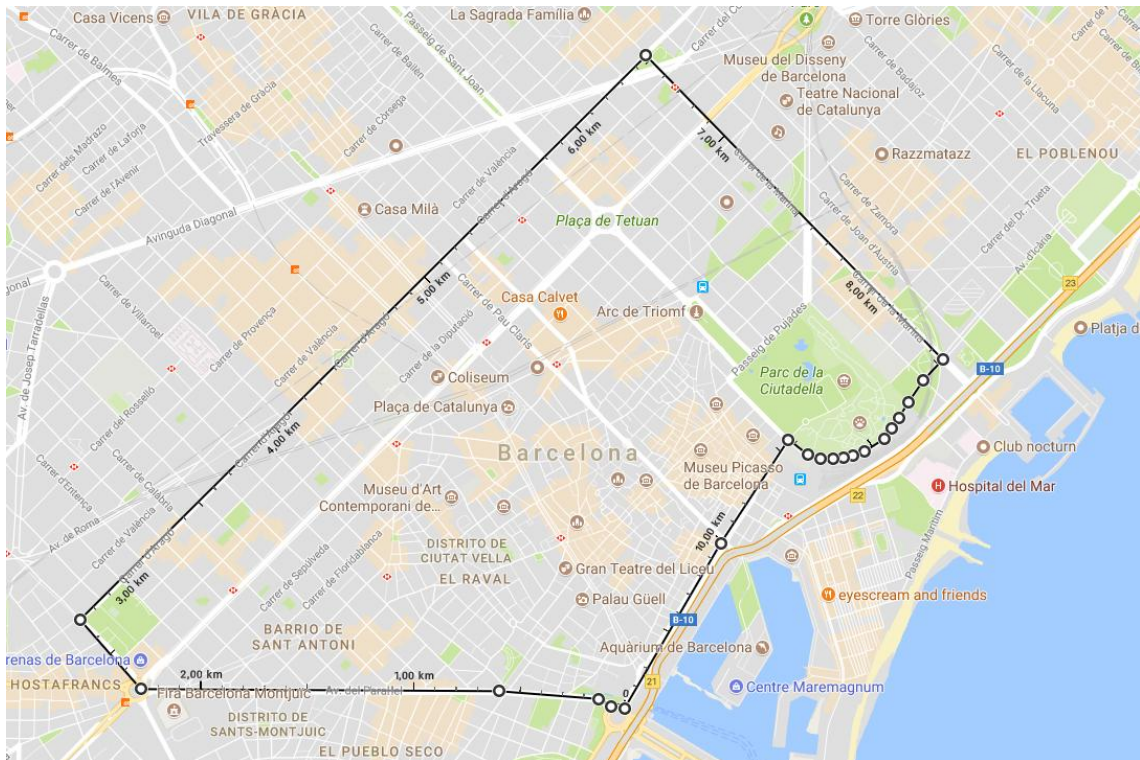


Fig. 12. Delimitació de la ZBE 1. Font: Google.

S'ha de tenir en compte que aquesta zona té molt poca influència en el trànsit global de la ciutat, ja que part d'aquesta zona ja és peatonal, i només inclou la Gran Via de les vies estructurals de la ciutat.

Aquesta zona té la peculiaritat que podria definir-se com una Zona Urbana de Protecció Ambiental (ZUAP), que tindria uns requisits d'entrada més estrictes, per tal de incrementar el nivell de qualitat de l'aire de les zones més peatonals i turístiques de la ciutat.

ZBE2

La segona ZBE és més extensa que l'anterior i inclou més vies prioritàries de la ciutat. Aquesta zona l'hem definit a partir d'un mapa de contaminació de Barcelona,

que es pot veure a la Fig. 13, on s'indiquen les zones amb un nivell d'emissions major, on es veu que l'eixample és la zona més contaminada. Tot i ser un mapa del 2008, creiem que no hi ha variacions en la jerarquia de circulació, i en tot cas, les variacions seran en volum, i per tant, les zones més contaminades seran les mateixes.

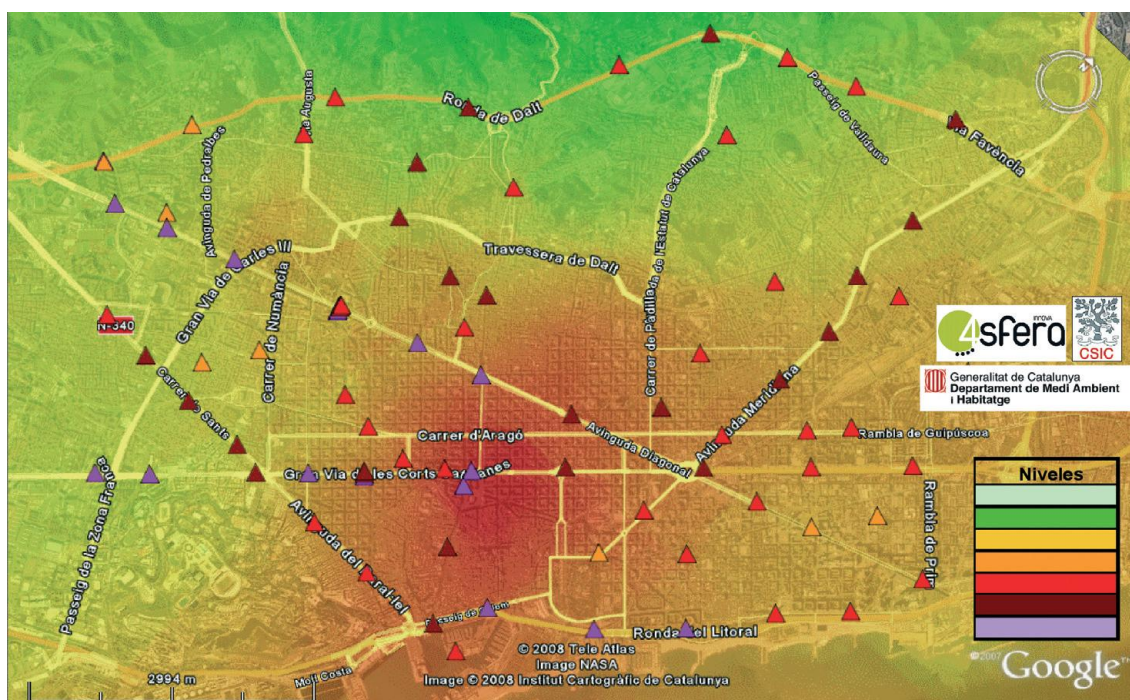


Fig. 13. Nivells mitjos mensuals (maig-juny 2008) de NO₂ registrats a Barcelona. Font: (Alastuey, Moreno, Viana, & Querol, 2012).

Per això, la ZBE 2, és una ampliació de l'anterior cap a l'interior de la ciutat, on els límits ara està definits pels carrers Paral·lel, Tarragona, Avinguda Tarradellas, Avinguda Diagonal, Via Augusta, Príncep d'Astúries, Travessera de Dalt, Padilla, Marià Claret, Meridiana, Marina, Aiguader i Passeig Colón, com es pot veure a la Fig. 14.

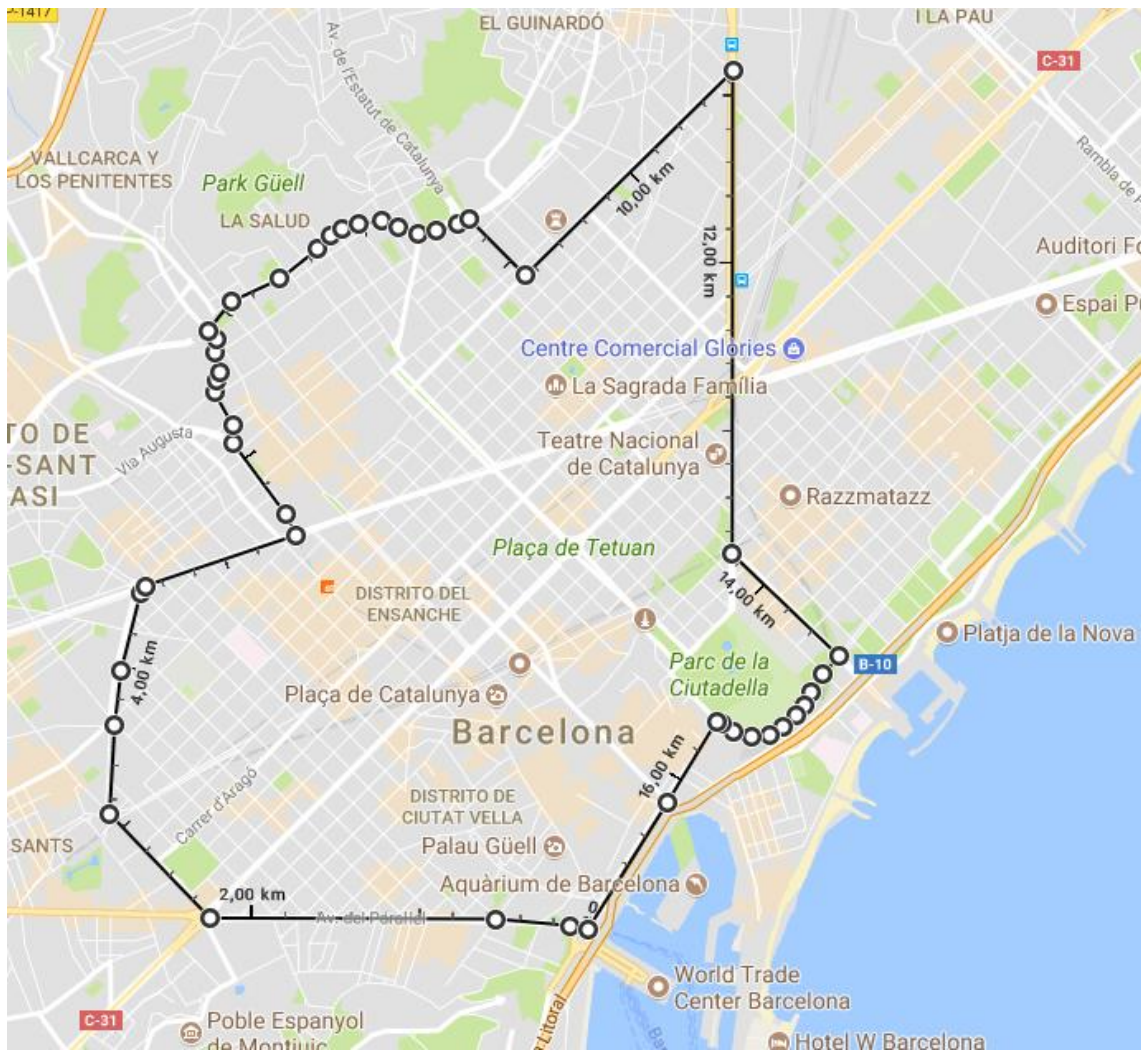


Fig. 14. Delimitació de la ZBE2. Font: Google Maps.

Com podem veure, aquesta zona inclou més vies prioritàries que la versió anterior, ja que intercepta carrers com la Gran Via, Aragó, València i part de l'Avinguda Diagonal, que són uns dels carrers amb més transit de Barcelona. Com en el cas anterior, els vehicles que circulin per la zona frontera no hauran de pagar cap mena de peatge.

ZBE 3

Per últim, ens queda definir la ZBE. Aquesta és la que té una màxima extensió, de aproximadament 50 km². També la podríem definir com a zona intrarondes, ja que és la zona compresa entre la Ronda de Dalt i la Ronda Litoral, a excepció de la Montjuïc i la Zona Franca, ja que aquestes zones tenen un important trànsit de vehicles pesats degut a que és una zona molt industrial, i també per que és una zona on no hi ha molts peatons. La seva delimitació la podem veure a la Fig. 15.



Fig. 15. Delimitació ZBE3. Font: Google Maps.

La ZBE3, té la mateixa extensió que la ZBE Barcelona que planteja la Generalitat de Catalunya, i per tant, podem constatar que els criteris per definir aquestes zones són semblants.

Altres paràmetres

Per poder ajustar l'estudi a la realitat s'han de tenir en compte diverses variables relacionades amb el comportament de les persones i els costos associats a la mobilitat. Per tant, aquests paràmetres s'han de monetitzar, ja que és la nostre manera de poder comparar els efectes sobre el trànsit.

El primer paràmetre que hem volgut determinar és l'elasticitat de la demanda. Aquesta variable és molt difícil de determinar, ja que qualsevol petita variació en les condicions pot acabar afectant al seu valor. Entre aquestes condicions, podem trobar-ne de molt diverses, des de la urgència del desplaçament, fins a les alternatives disponibles, que fan que l'elasticitat sigui més elàstica o menys.

En aquest cas, ens hem basat en l'estudi de l'elasticitat en autopistes de peatge (Matas & Raymond, 1999), comparen diferents casos i es determina que l'elasticitat mitja és de -0,25. És important dir, que aquest paràmetre s'hauria de determinar expressament pel cas de Barcelona, ja que és molt difícil trobar exemples amb les mateixes condicions.

El següent paràmetre a determinar és el trajecte mig dels vehicles, ja que si volem saber la reducció d'emissions que suposaria el nostre peatge, necessitem saber la quantitat de NO_x i PM_{10} que evitem que es generin.

Per poder fer-ho, ens hem basat en dades facilitades per l'Ajuntament de Barcelona a *Dades bàsiques de mobilitat 2014* (Ajuntament de Barcelona, 2015). Per calcular el quilometratge mig hem tingut en compte el nombre d'etapes en vehicle privat a Barcelona i el nombre de vehicles-quilòmetre de vehicles.

ETAPES TOTALS	2011	%	2012	%	2013	%	2014	%	%14/13
TRANSPORT PÚBLIC	3.126.796	39,92%	3.011.035	39,06%	3.011.787	39,31%	3.056.159	39,74%	1,47%
TRANSPORT PRIVAT	2.088.348	26,66%	2.056.519	26,67%	2.028.206	26,47%	2.013.558	26,19%	-0,72%
A PEU I BICICLETA	2.618.351	33,43%	2.642.035	34,27%	2.622.346	34,22%	2.619.937	34,07%	-0,09%
TOTAL	7.833.495	100%	7.709.589	100%	7.662.339	100%	7.689.654	100%	0,36%

Taula 8. Evolució del nombre d'etapes segons el tipus de transport. Font: (Ajuntament de Barcelona, 2015).

A la Taula 8, podem veure l'evolució del nombre d'etapes a Barcelona del 2011 al 2014, on podem veure que el transport privat ha anat reduint el nombre d'etapes, mentre que transport públic a augmentat. Aquesta evolució és una bona notícia pels nostres interessos, ja que quan més es redueixi el nombre d'etapes, tindrem els vehicles més temps estacionats.

A la Taula 9, podem veure l'evolució del nombre de vehicles-quilòmetre registrats a Barcelona entre el 2010 i 2014. Podem veure clarament, com hi ha hagut una reducció d'aquests, entre tots els vehicles motoritzats, s'han reduït gairebé 2 milions de vehicles-quilòmetre. Aquestes dades estan molt relacionades amb les mostrades anteriorment sobre el nombre d'etapes, i indiquen que les etapes que no es realitzen no estan compensades per més recorregut.

km-Passatger	2010		2011		2012		2013		2014		%14/13	
	VEH-KM	ÍNDEX OCUPACIÓ	VEH-KM	ÍNDEX OCUPACIÓ	VEH-KM	ÍNDEX OCUPACIÓ	VEH-KM	ÍNDEX OCUPACIÓ	VEH-KM	ÍNDEX OCUPACIÓ	VEH-KM	ÍNDEX OCUPACIÓ
Turismes	7.348.591	1,12	6.908.920	1,24	6.861.124	1,26	6.724.717	1,28	6.554.581	1,29	-2,53%	0,70%
Taxis	1.668.521	1,66	1.558.416	1,67	1.571.028	1,71	1.570.168	1,70	1.529.187	1,72	-2,61%	1,06%
Ciclomotors	977.325	1,00	897.373	1,00	893.281	1,00	868.393	1,00	842.775	1,00	-2,95%	0,00%
Motocicletes	1.450.142	1,01	1.331.191	1,01	1.276.116	1,01	1.235.861	1,01	1.214.975	1,02	-1,69%	0,79%
Furgonetes	2.012.504	1,39	1.861.275	1,38	1.863.239	1,41	1.824.818	1,41	1.809.860	1,42	-0,82%	1,00%
Camions	428.443	1,26	385.030	1,24	392.309	1,27	383.945	1,28	385.481	1,27	0,40%	-0,47%
Autobusos i autocars	241.753	36,12	217.630	35,21	227.156	34,56	222.653	35,66	223.366	36,32	0,32%	1,85%
Bicicletes	235.502	1,00	240.035	1,00	254.838	1,00	265.337	1,00	286.033	1,00	7,80%	0,00%
TOTAL	14.362.780	1,79	13.399.872	1,82	13.339.089	1,85	13.095.891	1,85	12.846.258	1,91	-1,91%	3,27%
VEH X KM veh. motor	14.127.278		13.159.836		13.084.252		12.830.554		12.560.225		-2,11%	

Taula 9. Evolució del nombre de vehicles-kilòmetre a Barcelona entre 2010 i 2014. Font: (Ajuntament de Barcelona, 2015).

Utilitzant aquestes dues dades, podem deduir que el desplaçament mig diari realitzat per cada vehicle dins de la ciutat és de 6,24 kilòmetres aproximadament.

Un cop determinat el desplaçament mig, necessitem saber la velocitat mitjana per poder saber el temps mig de trajecte dins del vehicle. Per saber-ho, també ens hem basat en les dades bàsiques de l'Ajuntament de Barcelona.

A la Taula 10, podem veure l'evolució de les velocitats mitjanes, segons el tipus de via, i podem veure com s'han mantingut relativament estables durant aquest temps. Pel nostre estudi, hem decidit utilitzar la velocitat registrada en vies de ciutat, ja que part del trajecte sempre acaba realitzant-se per aquest tipus de vies, i per tant, es posem en el pitjor cas. Com hem comentat, la velocitat de referència que tindrem en compte es de 20,6 km/h.

VELOCITAT	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	14/13%	14/11%
Vies Mar - Muntanya	16	15,9	16,7	17,9	16,7	16,6	16,6	17,3	18,5	17,8	16,4	16,8	17,1	17,0	-0,6%	3,8%
Vies Transversals	23	23,9	23,8	24,1	23,7	24,2	23,6	24,2	26,9	23,8	22,5	23,3	23,2	22,8	-1,7%	1,5%
Vies Connectivitat externa	22,4	22,1	25,8	24,9	22,1	22,3	22,9	22,9	25,8	24,8	24,0	23,6	23,5	22,9	-2,6%	-4,4%
Vies de ciutat	20,2	20,3	21,6	22	20,7	20,9	20,8	21,3	23,5	21,8	20,6	20,9	21,0	20,6	-1,9%	0,2%
Rondes	58,9	56,9	56,5	58,8	54,8	54,2	53,3	56,3	59,3	57,0	54,7	59,9	59,5	59,2	-0,5%	8,2%

Taula 10. Evolució de la velocitats segons el tipus de via. 2001-2014. Font: (Ajuntament de Barcelona, 2015).

Finalment, només ens falta definir el cost per kilòmetre del vehicle, i el cost del temps de viatge. El primer, segons els indicadors socioeconòmics i de l'activitat econòmica realitzats per l'Observatori del transport, del Ministeri de Foment, el cost mig d'un vehicle per kilòmetre l'any 2014 era de 28,02 cèntims.

Evolución del coste del transporte en vehículo privado desglosado por componentes															
centimos corrientes / veh-km	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Amortización	12,30	12,53	12,73	12,94	13,14	13,38	13,70	13,89	13,82	13,26	13,10	13,49	13,65	13,35	13,47
Combustible	7,06	6,95	6,99	7,04	7,53	8,29	8,90	9,04	9,68	8,65	10,03	11,36	12,28	12,35	11,92
Lubricante	0,42	0,42	0,42	0,42	0,45	0,50	0,53	0,54	0,58	0,52	0,60	0,68	0,74	0,74	0,72
Neumáticos	0,34	0,35	0,35	0,36	0,37	0,38	0,38	0,40	0,42	0,42	0,42	0,43	0,44	0,44	0,44
Reparaciones	0,74	0,76	0,80	0,84	0,89	0,94	0,99	1,04	1,09	1,13	1,16	1,19	1,22	1,25	1,25
Seguros	0,23	0,24	0,26	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,26	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22
Total centimos de € / veh-km	21,09	21,25	21,55	21,88	22,66	23,76	24,80	25,19	25,85	24,23	25,55	27,39	28,56	28,35	28,02
Total sin Amortización ni combustible	1,73	1,77	1,83	1,90	1,99	2,09	2,19	2,25	2,35	2,32	2,42	2,54	2,63	2,65	2,62
Coste / pax-km	12,12	12,21	12,39	12,57	13,03	13,66	14,25	14,48	14,86	13,92	14,68	15,74	16,41	16,30	16,10

Taula 11. Evolució del cost del transport en vehicle privat. 2000-2014. Font: Observatorio del Transporte, Ministeri de Foment.

Pel que fa al segon paràmetre, el cost del temps, ens hem basat en l'estudi del valor del temps en congestió (Álvarez San-Jaime & Cantos Sánchez, 2009), on estableixen que el valor del temps està al voltant de 9,4€. Aquest valor creiem que és bastant robust, ja que sovint s'obtenen valors semblants en diferents ciutat amb un grau de desenvolupament semblant.

Quantificació de les emissions

Per poder determinar el preu del peatge a aplicar per tal de reduir les emissions totals emeses, cal conèixer quin és el nivell d'emissions de cada grup de vehicles, d'aquesta manera, podrem saber el total de tones de gasos contaminants que no s'emetrà.

Per saber-ho podríem pensar que aquestes no superaran els límits establerts per les normatives EURO, però això no és cert, ja que amb l'ús dels vehicles, els filtres

que disminueixen les emissions van perdent efectivitat, i per tant, els cotxes més ús generaran més contaminants que no pas el mateix vehicle amb menor quilometratge. Un altre factor que afecta a les emissions és el manteniment del vehicle, ja que com millor funcioni el motor i tots els components del sistema d'escapament de gasos més net serà el vehicle.

Un altre factor que fa veure que les emissions reals no coincideixen amb les teòriques és l'escàndol protagonitzat per Volkswagen, on es va demostrar que els seus vehicles diesel contaminaven més del que certificaven.

Així doncs, ens hem basat en l'estudi sobre l'avaluació de la reducció dels nivells de NO_x i PM_{10} a Barcelona (Barcelona Regional, 2011), on es caracteritza el parc mòbil en funció de les seves emissions.

Aquest estudi calcula les emissions reals dels vehicles que circulen a la ciutat en diferents punts, per tal de tenir dades a diferents velocitats i diferents nivells de congestió. Els resultats que hem utilitzat són els nivells mitjos obtinguts tant per vehicles de gasolina com per vehicles diesel, segons el tipus de vehicle i segons la normativa EURO que segueixen.

En el nostre cas, per facilitar els càlculs, hem calculat les emissions mitges per el trajecte mig dins de la ciutat de Barcelona segons l'etiqueta i segons el tipus de vehicle tenint en compte els resultats de l'estudi mencionat anteriorment.

A Taula 12 podem veure les l'exemple de les emissions dels turismes considerades segons el trajecte mig. També cal mencionar que l'estudi va fer les mesures de l'any 2008, i per tant, no circulaven vehicles EURO VI i molt pocs EURO V,

pel que no es van poder obtenir valors fiables, pel que hem optat per utilitzar els límits establerts per les normatives EURO i estar pel costat de la seguretat.

Emissions g/km Turisme				
Norma Euro	Gasolina		Diesel	
	NOX	PM	Nox	PM
PreEURO	2,45	0,2	1,59	0,326
EURO1	1,15	0,05	0,92	0,154
EURO2	0,72	0,03	1,14	0,161
EURO3	0,38	0,02	1,13	0,123
EURO4	0,21	0,01	0,63	0,079
EURO5	0,06*	0,005*	0,18*	0,005*
EURO6	0,06*	0,005*	0,08*	0,005*

Emissions mitjes per etiqueta				
Etiqueta	NOX	PM	NOX	PM
A	1,49	0,10	1,21	0,175
B	0,38	0,02	0,445	0,0485
C	0,14	0,008	0,08	0,05

Emissions g/vehicle				
Etiqueta	NOX	PM	NOX	PM
A	9,31	0,64	7,54	1,09
B	2,37	0,12	2,77	0,30
C	0,88	0,048	0,49	0,31

Taula 12. Emissions reals dels turismes diesel i gasolina. Font: (Barcelona Regional, 2011).

**valors determinats per la normativa EURO*

6. Resultats

Comparativa entre ZBE

En aquest apartat aplicarem a la nostre formulació els valors dels paràmetres que hem indicat anteriorment per tal d'observar com afecta a les emissions l'extensió de la zona tarifada.

Per obtenir els resultat, hem iterat el valor de la taxa a pagar fins que hem obtingut la reducció del 30% en les emissions que teníem com a objectiu. Els resultats obtinguts són els que presentem a la Taula 13, on s'indica la taxa aplicar, el nombre de vehicles afectats, així com el percentatge dels vehicles reduïts de cada grup dels que entren a la zona i la recaptació.

ZBE 1				
Etiqueta	Taxa (€)	% veh. Afectats	Veh afectats	€ recaptats diaris
C	14 €	38,09%	24.465	556.673,80 €
B	23 €	62,58%	93.996	1.292.808,48 €
A	36 €	97,95%	187.633	141.438,90 €
ZBE 2				
Etiqueta	Taxa (€)	% veh. Afectats	Veh afectats	€ recaptats diaris
C	4 €	10,88%	10.956	358.836,89 €
B	14 €	38,09%	89.674	2.040.432,27 €
A	23 €	63,67%	191.152	2.552.611,30 €
ZBE 3				
Etiqueta	Taxa (€)	% veh. Afectats	Veh afectats	€ recaptats diaris
C	3 €	8,16%	9.445	323.237,45 €
B	10 €	27,21%	73.630	2.004.385,45 €
A	21 €	57,14%	197.196	3.198.992,61 €

Taula 13. Resultats obtinguts per cada ZBE.

Primerament, comparem el nombre vehicles que deixaria de circular diàriament en total a cadascuna de les zones. Podem veure a la Fig. 16 com a mesura

que augmenta la distància la disminueix el nombre de vehicles afectats. Concretament, si augmenta 5 km² es disminueixen uns 15.000 i si augmentem 40 km² respecte la ZBE 2 disminuïm el nombre d'afectats en 10.000 vehicles més. Per tant, això ja ens dóna una primera idea de quin és el comportament del peatge.

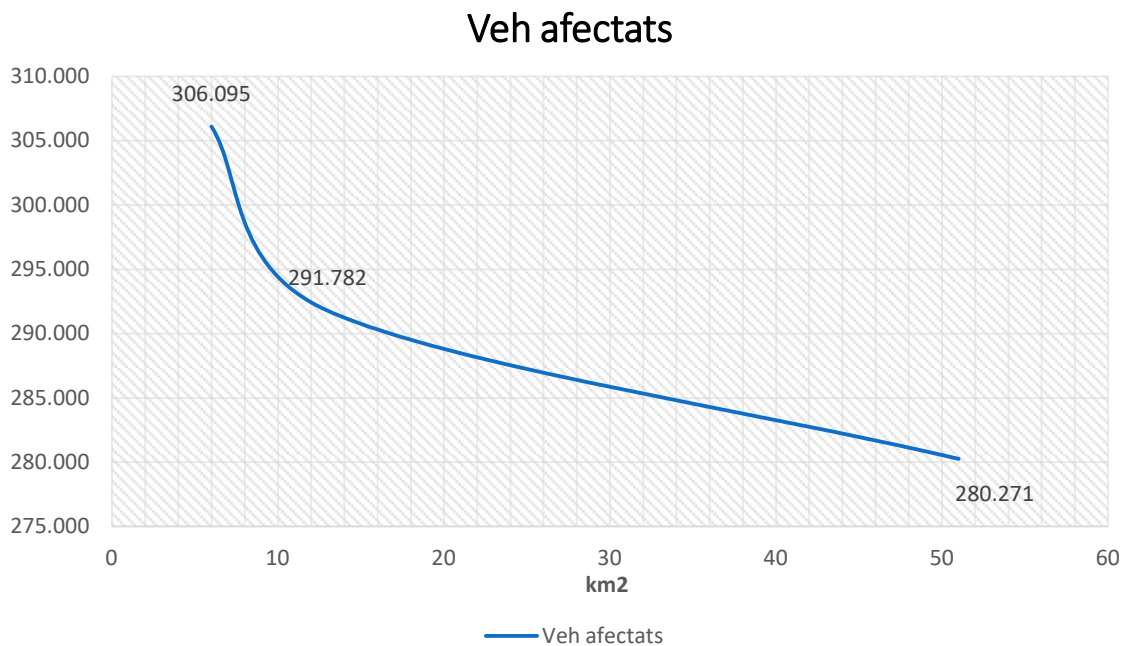


Fig. 16. Nombre de vehicles afectats segons l'extensió de la ZBE.

Si separem segons l'etiqueta dels vehicles, podem veure a la Fig. 17 com per l'etiqueta A augmenta el nombre de vehicles afectats i en canvi per les altres etiquetes disminueix. Això és degut al fet que quan més gran és l'àrea més vehicles entren, i surten i per tant, podem aplicar la taxa als vehicles amb l'etiqueta A que són els més contaminant. D'aquesta manera es perjudica menys als usuaris de vehicles més nets.

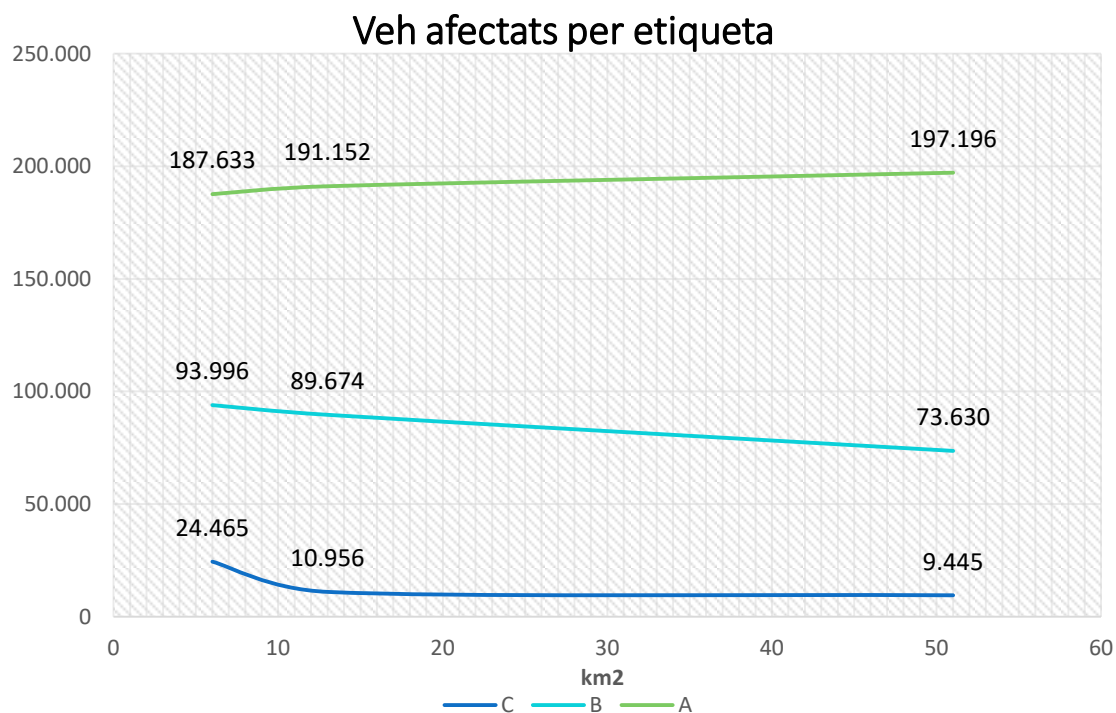


Fig. 17. Nombre de vehicles afectats per etiqueta i extensió de les ZBE.

Però no només hem de mirar al valor absolut de vehicles afectats, sinó que també hem de tenir en compte el percentatge de vehicles que no entraran a aquestes ZBE proposades. A la Fig. 18 veiem com disminueix dràsticament entre les ZBE 1 i 2, i en menor mesura entre la 2 i la 3. Això és degut a que la ZBE 1 té molt poc transit, i això fa que un percentatge petit del transit de la ciutat hagi de compensar les emissions de la resta de la ciutat, i per tant, a mesura que augmentem la zona d'influència els percentatges disminueixen però també aconseguim repartir aquestes reduccions de transit. El cas més significatiu és el de l'etiqueta A on passem de gairebé el 98% al 57% de vehicles afectats.

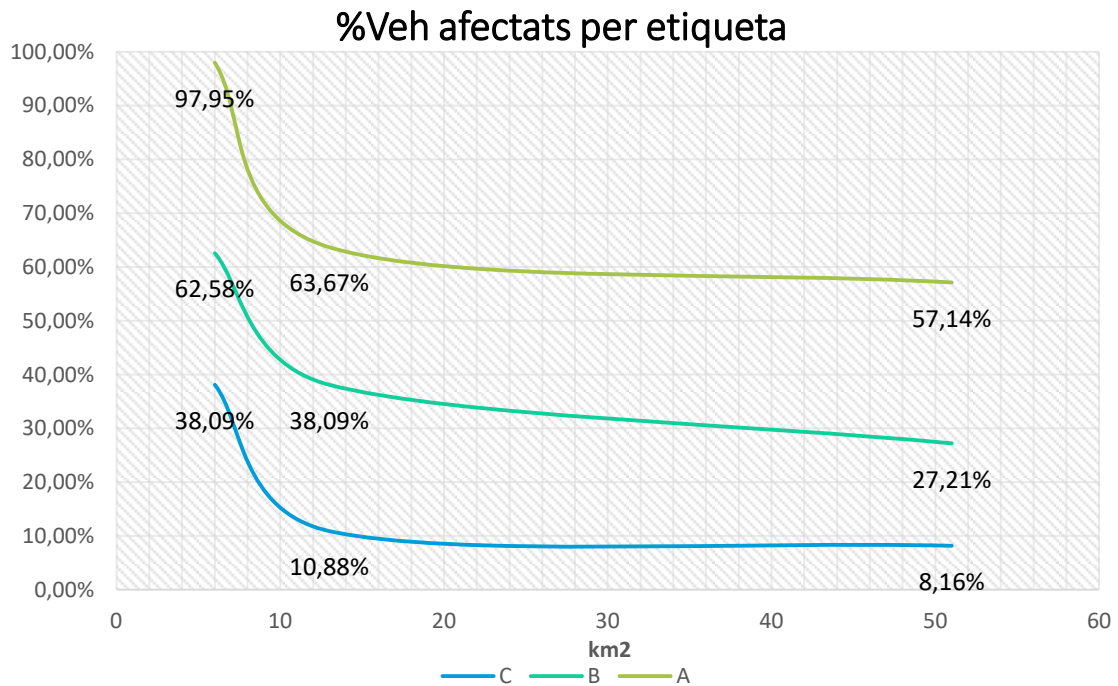


Fig. 18. Percentatge de vehicles afectats segons etiqueta y extensió de les ZBE.

Per últim, si mirem la recaptació anual, veiem a la Fig. 19 com el comportament és totalment contrari al de la resta de paràmetres que hem comparat, ja que en aquest cas, a mesura que augmenta l'àrea augmenta la recaptació. Això és degut a que tot i tenir taxes més baixes apliquem la taxa més elevada a més vehicles, i per tant, fa que augmentin els ingressos.

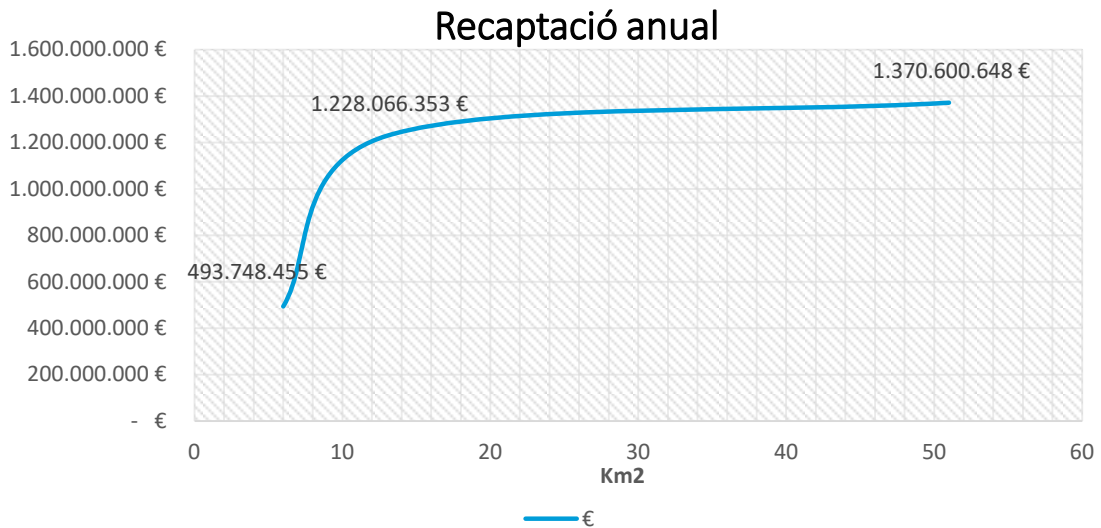


Fig. 19. Recaptació anual segons la ZBE.

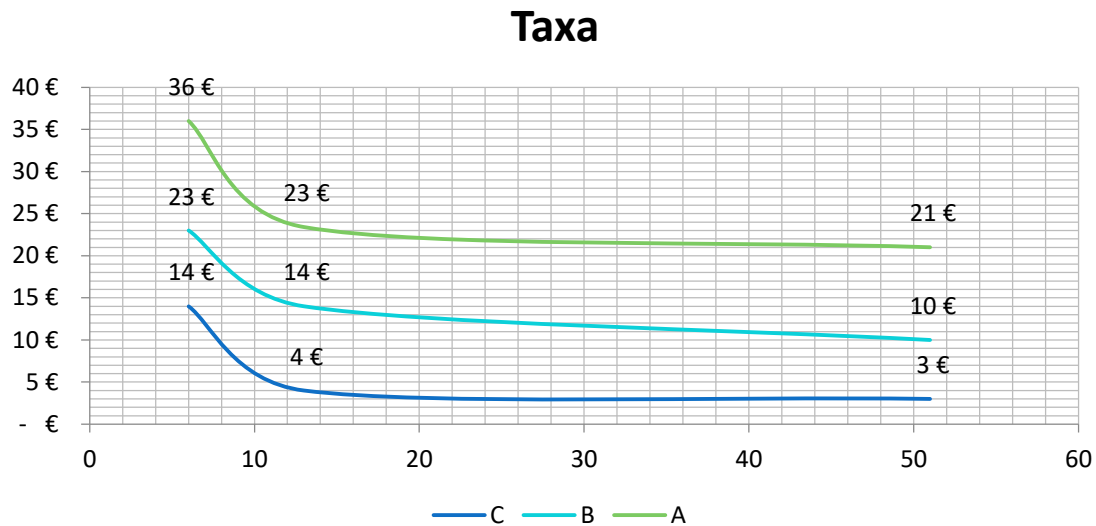


Fig. 20. Taxa aplicada a cada etiqueta segons la ZBE.

Per últim, queda mirar quina és la taxa que apliquem, que podem veure representada a la Fig. 20. Com es pot veure a la Taula 13, per la ZBE1 apliquem taxes que van dels 14€ per els vehicles amb etiqueta C, fins als 36€ de la etiqueta A. Lògicament, aquestes taxes no són viables, ja que són massa elevades i per tant, només intentarien accedir els usuaris més rics o per casos d'alta necessitat.

Pel que fa a la ZBE2, la taxa va des dels 4€ als 14€ i 23€ per cada etiqueta. En aquest cas, per els vehicles amb etiqueta C el preu de la taxa és més assequible, i permet als usuaris amb menor poder adquisitiu l'entrada a la zona habitualment, en canvi, per la resta d'etiquetes segueix sent un preu massa elevat, i per tant, pagaran la taxa els usuaris amb més poder adquisitiu que utilitzin vehicles amb etiqueta B i especialment amb etiqueta A.

Finalment, si mirem la ZBE3, la taxa va dels 3€ per etiqueta C, 10€ per la B i 21€ per la A. Com en cas anterior, tenim una taxa assequible per la majoria de la població amb vehicles amb etiqueta C, en canvi, tot i millorar les condicions de la ZBE2 per a la resta d'etiquetes, encara no es suficient per tal de aplicar un peatge que no penalitzi en excés als usuaris amb menys renda.

Com podem veure, no és viable aplicar cap de les ZBE, ja que les taxes a pagar són molt elevades, i es penalitza en excés els usuaris amb menys renda que tinguin cotxes antics, que en molts casos tampoc pot comprar un vehicle nou amb una etiqueta superior. Un altre punt que hem de tenir en compte és el fet que es tracta a tota la ZBE de la mateixa manera i busca el mateix objectiu de reducció d'emissions. Això fa que la ZBE1 hagi d'aplicar taxes elevadíssimes i restringir el transit casi per complet a la zona. Per altre banda, les altres dues zones no apliquen proteccions especials a zones més delicades com pot ser el centre de la ciutat, i per tant, les zones més transitades ho seguiran sent, tot i que amb un volum de vehicles inferior.

Un altre punt a tenir en compte, és el fet que a major extensió de l'àrea més vehicles circularan sense creuar la frontera i per tant no se'ls aplicaria la taxa. Per tant,

caldria estudiar la possible aplicació d'una taxa per a residents obligatòria i que poguessin gaudir de descomptes per tal de no veure's perjudicats en excés.

Comparació entre l'aplicació individual o en conjunt

Veient això, creiem que hi ha una millor solució aplicant conjuntament les tres ZBE conjuntament, de manera que es vagi incrementant el cost a mesura que ens acostem al centre, de manera que incentivéssim als usuaris que entren a Barcelona a aparcar el vehicle a les zones més perifèriques per tal de no veure incrementada en excés la taxa diària.

La zonificació d'aquestes ZBE serien les presentades anteriorment per tal de poder comparar el funcionament tant individual com en conjunt de la nova estratègia tarifària. També cal recordar que l'objectiu és el mateix, reduir un 30% el global d'emissions relacionades amb el transit.

ZBE 1					
Etiqueta	Taxa (€)	Taxa acumulada (€)	% veh. afectats	Veh. afectats	€ recaptats diaris
C	1 €	3 €	-8,16%	-4.815	54.170,38 €
B	5 €	11 €	-29,93%	-33.947	397.388,34 €
A	10 €	22 €	-58,50%	-61.752	438.116,57 €
ZBE 2					
Etiqueta	Taxa (€)	Taxa acumulada (€)	% veh. afectats	Veh. afectats	€ recaptats diaris
C	1 €	2 €	-5,44%	-5.329	87.782,56 €
B	3 €	6 €	-16,32%	-35.295	440.886,21 €
A	7 €	12 €	-31,29%	-81.162	757.116,74 €
ZBE 3					
Etiqueta	Taxa (€)	Taxa acumulada (€)	% veh. afectats	Veh. afectats	€ recaptats diaris
C	1 €	1 €	-2,72%	-3.148	103.899,26 €
B	3 €	3 €	-8,16%	-22.089	548.213,99 €
A	5 €	5 €	-13,60%	-46.951	798.314,99 €

Taula 14. Resultats obtinguts amb utilitzant totes les ZBE conjuntament.

A la Taula 14 mostrem els resultats obtinguts utilitzant les tres ZBE conjuntament, de manera que es vagi incrementant el cost d'accedir al centre de la ciutat. A continuació, analitzarem els resultats paràmetre a paràmetre i ho compararem amb els resultats d'utilitzar les zones individualment.

Primer compararem el nombre de vehicles afectats per les diferents taxes, com podem veure a la Fig. 21. En aquest cas, també em tingut en compte el total de les diferents zones, ja que actuen conjuntament. En aquest cas, veiem com els efectes particulars de cada zona són molt menors, però globalment, afectem a un nombre semblant de vehicles. La diferència en aquest cas és que es reparteix entre les diferents zones.

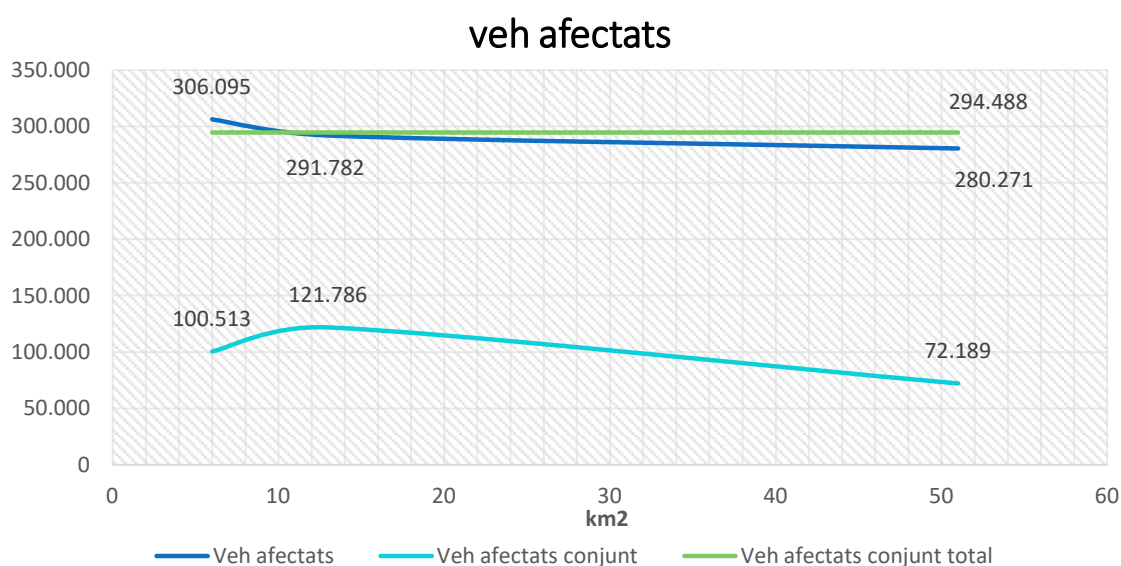


Fig. 21. Comparativa del nombre de vehicles afectats per cada ZBE entre aplicació simple o conjunta.

Si ara ens fixem en el nombre de vehicles afectats per etiqueta, que podem veure a la Fig. 22, veiem com sempre tenim un volum menor de vehicles afectats a cada frontera. Si ens fixem en el comportament de la segona frontera, veiem com aquesta és la que més vehicles afecta. Això és degut a que creiem que la frontera

exterior ha de ser permissiva i funcionar com una espècie de P&R, ja que aquesta zona ja disposa de transport públic per tal de poder acostar els usuaris al centre i permetent entrar a la ciutat a preus assequibles. D'aquesta manera la segona frontera, que és la que delimita la zona més contaminada, restringeix més vehicles i faria a efectes pràctics d'autèntica ZBE al tenir preus més elevats. Per últim, tenim la ZBE interior, que també restringeix més vehicles que l'exterior, però en aquest cas, perquè correspondria a una ZUAP, ja que delimita el centre de la ciutat i la zona amb més peatons.

També cal recordar que el nombre d'afectats és semblant al casos individuals, però més repartit.

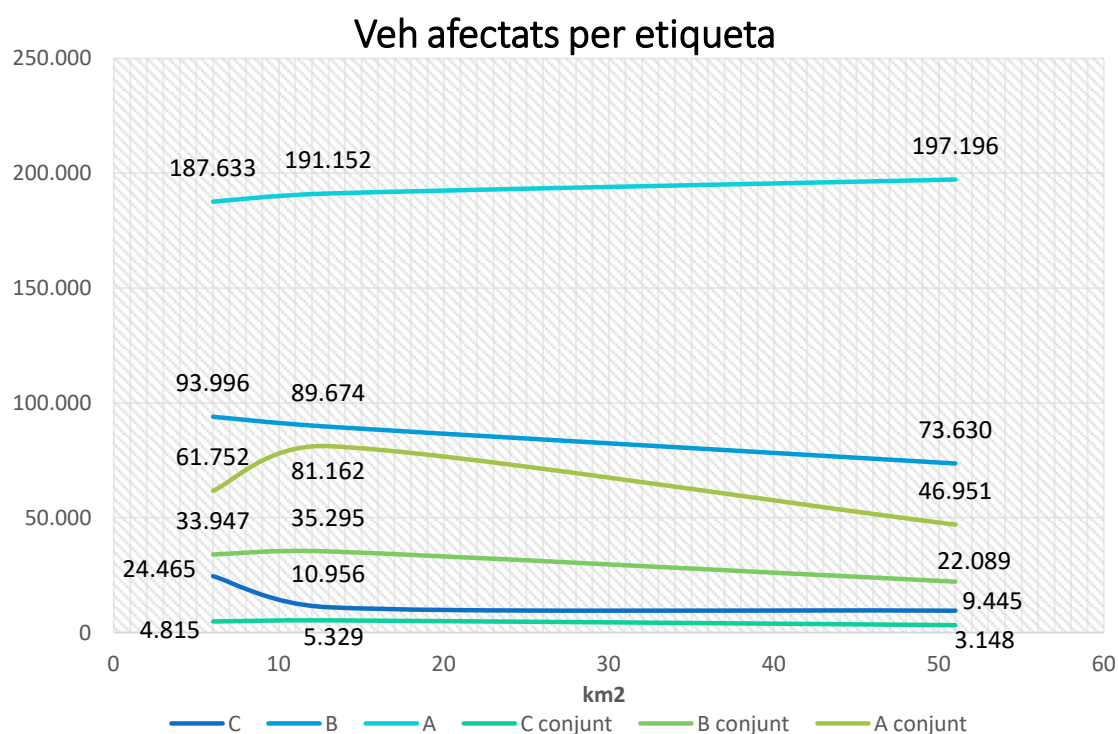


Fig. 22. Comparativa del nombre de vehicles afectats segons etiqueta en cada ZBE en aplicació simple o conjunta.

Si mirem el percentatge de vehicles que no entraran a cada ZBE veiem com aquests disminueixen dràsticament respecte als percentatges obtinguts aplicant les

ZBE individualment com podem veure a la Fig. 23. També veiem com seguim tenint percentatges més elevats quant més contaminants són els vehicles.

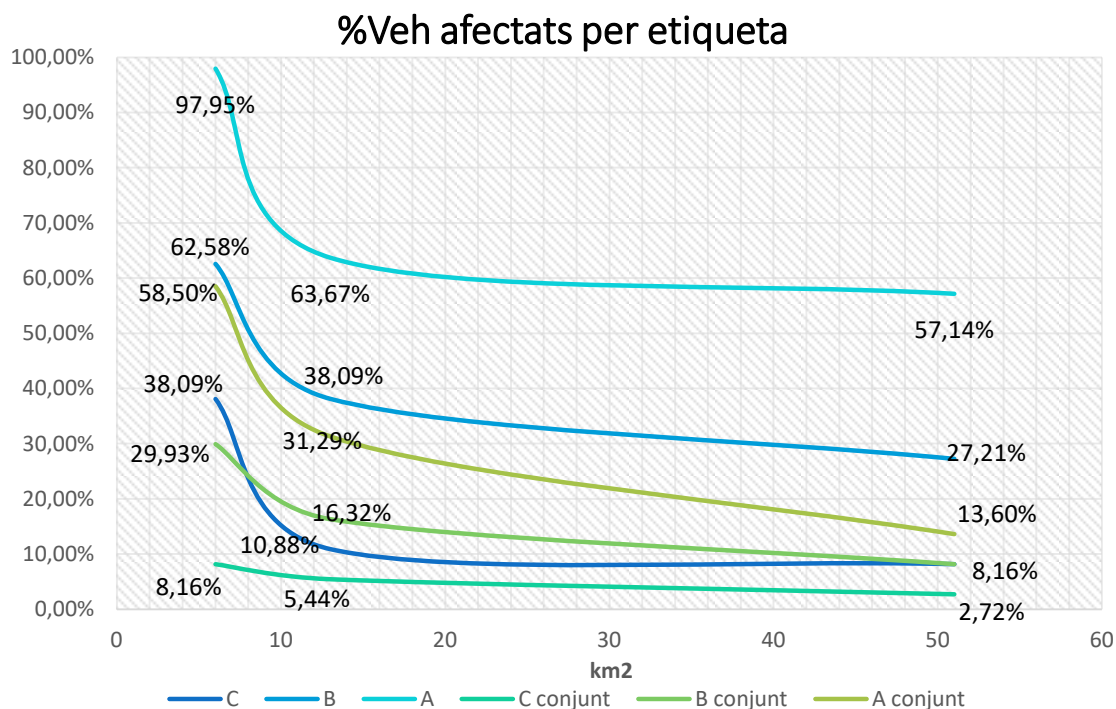


Fig. 23. Comparativa del percentatge de vehicles afectats per etiqueta entre aplicació simple o conjunta.

Per últim, queda valorar les tarifes aplicades, com podem veure a la Taula 14, tenim una columna on indiquem la taxa i una on indiquem la taxa acumulada. La primera fa referència al increment en la taxa pel fet de creuar-la i la segona a la taxa total a pagar. Això és degut al fet que per facilitar els càlculs, hem tingut en compte que els vehicles que creuen una frontera han creuat les anteriors.

Mirant els valors d'aquestes, veiem com la taxa a pagar pels vehicles amb etiqueta C és molt competitiva, ja que és de un euro per frontera, pel que el màxim a pagar seria de 3 €. En canvi, pels vehicles amb etiqueta B, el preu s'ha incrementat, però continua sent prou baix, passant dels 3€ a la ZBE3, als 6€ a la ZBE2 i als 11€ a la

ZBE1. Tot i ser una tarifa que per a arribar al centre pot ser elevada, és bastant ajustada a la realitat econòmica de la societat. Per últim, per a l'etiqueta A, si que tenim uns preus més elevats, especialment per accedir al centre, ja que passem dels 5€ de la ZBE1 als 11€ de la ZBE2 i als 21€ de la ZBE1. Com em comentat abans, els preus per accedir a la ciutat sempre són assequibles, per tal de permetre a tots els usuaris accedir-hi, però comencem a aplicar restriccions més elevades per acostar-se al centre. D'aquesta manera, reduïm l'entrada dels vehicles més contaminants a les zones més saturades i així, a part de reduir el volum total, també intentem reduir les concentracions al tenir vehicles que expulsen menors quantitats de NO_x i PM₁₀.

7. Conclusions i investigació futura

Hi ha moltes maneres per intentar reduir les emissions generades a les ciutats. Hem pogut veure com a diferents ciutats d'Europa s'ha implantat la solució de les ZBE, amb diferents graus de restricció, on s'han obtingut bons resultats, que per tant, constaten el bon funcionament d'aquestes zones amb transit restringit als centres de les grans ciutats, i també de pobles més petits, on els carrers més cèntric acostumen a tenir una major concentració de transit, i per tant, traspassen aquest volum de cotxes cap a l'exterior, fent que aquests es reparteixin pels voltants.

En el cas concret de Barcelona, s'han dissenyat diverses mesures, especialment en cas d'episodi, on trobem eficiències de tot tipus, i en molts casos, basades en canvi modal cap a la bicicleta o el TP. En aquest sentit, creiem que basar la reducció d'emissions en que els usuaris del VP es passaran al TP només pel fet de fer-ne promocions puntuals (que suposa un benefici per l'usuari esporàdic) o millores del servei (que suposen un benefici per els usuaris habituals) és molt optimista. En tot cas, les mesures preses aconsegueixen reduir la quantitat d'emissions, però no prou per arribar a nivells més saludables, ni de prou durada com per aconseguir solucionar el problema de base.

Des de la Generalitat de Catalunya, també s'han implantat una sèrie de restriccions al transit imposades que s'aniran aplicant progressivament fins al 2025, on finalment es prohibirà circular a certs vehicles que no compleixin una sèrie de condicions. En aquest sentit, creiem que prohibir la circulació de vehicles no és la millor idea, ja que ens trobarem que hi haurà usuaris que hauran de canviar de vehicle

tot i que en facin un us esporàdic, i per tant, que no tinguin efectes importants sobre les emissions. Per altre banda, també s'haurien de permetre excepcions o limitacions de quilòmetres màxims a recórrer per tal de poder utilitzar els vehicles prohibits esporàdicament, així com permetre l'ús de vehicles històrics, que ja tenen una limitació de quilometratge.

Aquestes mesures de la Generalitat, han aconseguit implicar a diversos consistoris, fet que fa que no es concentrin totes les limitacions a la ciutat de Barcelona, sinó que també afectin a l'àrea metropolitana, de manera que hi ha molts més afectats, dels quals molts treballen o estudien a la ciutat, i no només els afectarà en aquests desplaçaments, sinó que també en els de proximitat, fent més necessària la modernització del parc mòbil.

Veient aquests exemples de mesures aplicats, nosaltres hem proposat un peatge ambiental, que no prohibeix la circulació a cap vehicle, però que incrementa el cost d'accedir al centre a tots els vehicles, especialment als més contaminants.

Primerament, hem buscat una zona òptima d'aplicació, comparant tres extensions diferents. Fent aquesta comparativa ens hem trobat que tot i aconseguir reduir un 30% les emissions, hem vist que aquesta mesura no és aplicable degut a l'elevat cost de la taxa que hauríem d'aplicar, que fa que sigui prohibitiu (entre 14 i 36€ a la zona més petita i entre 3 i 21€ a la més gran), i per tant, no pot aplicar-se.

Per aquest motiu, hem buscat una alternativa aplicant aquesta idea: aplicar les diferents zones simultàniament, incrementat el cost a mesura que ens acostem al centre. Com es pot veure als resultats, aquesta mesura és viable, ja que el cost per els vehicles menys contaminats és prou assequible (3€), i en canvi per els més

contaminants si que és prohibitiu arribar al centre (21€), però assequible accedir a la resta de la ciutat, permetent utilitzar les parts exteriors de la ciutat com a P&R, aprofitant l'existència d'un bon TP en aquelles zones.

D'aquesta manera no impedim els viatges esporàdics, i en penalitzem els usuals amb vehicles contaminants, de manera que a la llarga, s'indueix a canviar de cotxe o a fer el canvi modal.

És important dir que per què això funcioni hi ha d'haver una sèrie de subvencions, especialment per les famílies amb menor poder adquisitiu. L'origen de les subvencions podria venir de la recaptació de les taxes, que també permetria assumir el cost del sistema de càmeres necessari pel control de les entrades i sortides, a part de permetre invertir en altres iniciatives relacionades amb la reducció de les emissions i la inversió en millora de la ciutat.

D'aquests beneficis, es fàcil veure que a mesura que es vagi modernitzant el parc mòbil, els beneficis s'aniran reduint, ja que els vehicles seran cada vegada més nets, per tant, aquesta mesura és "temporal", en el sentit que hi haurà un moment que tindrem molt pocs vehicles com els actuals, i per tant, podríem dir que les ZBE hauran acabat la seva feina tot i que poden adaptar-se a altres funcions com pot ser el control de la congestió.

Per últim, hem de dir que per millorar l'eficiència d'aquesta mesura, hauria de complementar-se amb altres mesures com les ja plantejades, per tal de millorar-ne l'eficiència de totes en conjunt i també involucrar a ciutadans en problema que tenim actualment.

Per altre banda, hem de comentar que per poder dimensionar les diferents ZBE, així com per calcular la taxa òptima, calen una sèrie de dades que actualment no estan disponibles o no són fàcils d'obtenir i a vegades, tot i estar disponibles, no són prou fiables.

Per tant, d'aquí podem treure idees per investigacions futures relacionades amb aquest tema, com seria aconseguir el "vídeo" dels moviments dins de la ciutat de Barcelona, per tal de conèixer per on passen els vehicles i quan passen per tal de poder adaptar totes les suposicions que hem aplicat a la realitat.

Juntament amb aquesta idea, també caldria una caracterització del parc mòbil circulant real de la ciutat, així com una actualització dels estudis de càlcul d'emissions reals dels vehicles, ja que veient els escàndols relacionats amb les emissions de diferents empreses automobilístiques, no ens podem fiar de les dades aportades pels fabricants.

Una altra idea que caldria estudiar amb profunditat, és la aplicació d'aquesta taxa a la flota de taxis i a la DUM, ja que tenen un pes molt important en les emissions, i també tenen la necessitat de circular, i per tant, necessiten tracte especial per tal de possibilitar el seu bon funcionament.

Referències

- Ajuntament de Barcelona. (2015). *Dades bàsiques de mobilitat 2014*. Barcelona.
- Ajuntament de Barcelona. (2015). *Pla de Mobilitat Urbana de Barcelona, PMU 2013-2018*.
- Alastuey, A., Moreno, T., Viana, M., & Querol, X. (2012). *Bases científico-técnicas para un Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire*. Madrid: CSIC.
- Álvarez San-Jaime, Ó., & Cantos Sánchez, P. (2009). El valor del tiempo con congestión: El caso de la Radial-3. *Revista de Economía Aplicada*, XVII, 55-80.
- Barcelona Regional. (2011). *Avaluació de la reducció d'emissions d'NOx i PM10 dels vehicles que circulen per Barcelona, en base a la caracterització del parc mòbil de la ciutat*.
- Brandson, & Nicholson. (1990). *Science of the Total Environment*, 93, 349 - 358.
- Daganzo, C. (Abril de 1994). A pareto optimum congestion reduction scheme. *Transportation Research*, 29B(3).
- Eliasson, J. (May de 2009). A cost-benefit analysis of the Stockholm congestion charging system. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43, 468-480.
- Ferran, A. (2015). *Treballant per un aire net a l'aglomeració de Barcelona*. Generalitat de Catalunya, Departament de Territori i Sostenibilitat.

Holman, C., Harrison, R., & Querol, X. (2015). Review of the efficacy of low emission zones to improve urban air. *Atmospheric Environment*, 161-169.

Matas, A., & Raymond, J. L. (1999). Elasticidad de la demanda en las autopistas de peaje. *Papeles de Ecoomia Española*(82), 140-165.

Ministerio de Fomento. (2016). *El transporte urbano y metropolitano en España. Abril 2016*.

Ministerio del Interior. (21 de Abril de 2016). Boletín Oficial del Estado. 96, 26896 - 26901.

Transport for London. (2008). *Central London Congestion Charging Impact monitoring*.

